



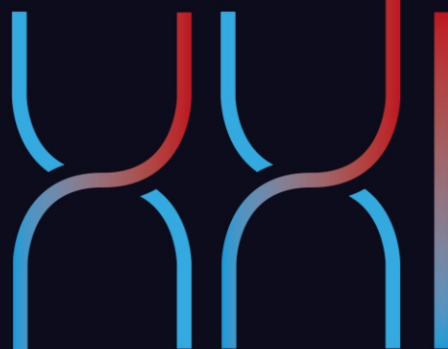
**UASLP**  
Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí



INSTITUTO DE  
INVESTIGACIÓN EN  
COMUNICACIÓN ÓPTICA

# MEMORIAS

**PREMIO DE INSTRUMENTACIÓN Y ELECTRÓNICA 2021**  
**“DR. GUSTAVO DEL CASTILLO y GAMA”**



SEMANA DEL IICO  
**FRONTERAS  
DE LA ÓPTICA**

del 17 al 24 de septiembre

CONFERENCIAS | CURSOS | MESA REDONDA

# Diseño Gráfico y Formación

Dr. Luis Felipe Lastras Martínez

Dra. Marcela Mejía Carlos

Ing. Liliana del Carmen Mendoza Tello

## Responsable de la edición

Dr. Daniel Ulises Campos Delgado

ISBN:978-607-9343-37-8

© Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, UASLP.

## Presentación

Después de un año en pausa, nos es grato presentar las memorias del premio de Instrumentación y Electrónica “Gustavo del Castillo y Gama” en su versión 2021. Ha sido un año difícil lleno de retos y aprendizajes. La pandemia ha cambiado la forma de transmitir el conocimiento y a la vez nos ha permitido explorar nuevas herramientas y métodos de enseñanza. En esta ocasión el premio de Instrumentación y Electrónica 2021 se llevó a cabo de manera remota. A pesar de esta nueva modalidad, el entusiasmo y participación de los estudiantes tanto de la Universidad como de otras instituciones de nivel superior de la Ciudad y de la región fue muy positiva y exitosa. En esta versión se inscribieron 9 proyectos tanto en temas de instrumentación electrónica orientada tanto a la ingeniería aplicada como a la básica y con enfoques de investigación y docencia. Estos proyectos son de gran calidad y tienen un excelente grado de desarrollo.

Quisiéramos agradecer al jurado del premio por el interés y profesionalismo que mostraron. En esta ocasión el jurado estuvo formado por los investigadores, Dr. Ricardo Castro García, Dr. Abel García Barrientos y Dr. Luis Javier Ontañón García Pimentel. Muchas gracias nuevamente.

Comité organizador

## **Rector**

Dr. Alejandro Javier Zermeño Guerra

## **Secretario General**

M. en D. Federico Arturo Garza Herrera

## **Director**

Dr. Daniel Ulises Campos Delgado

## **Comité organizador del concurso**

Dr. Raúl Eduardo Balderas Navarro

Dr. Edgar Armando Cerda Méndez

Ing. Jorge Antonio González Fortuna

Dr. Luís Felipe Lastras Martínez

Dr. Miguel Ángel Lastras Montaña

Dra. Marcela Mejía Carlos

Ing. Liliana del Carmen Mendoza Tello

Dr. Oscar F. Núñez Olvera

Maestro Esequiel Ontiveros Hernández

Ing. Francisco Ramírez Jacobo

## **Jurado**

Dr. Ricardo Castro García

Dr. Abel García Barrientos

Dr. Luis Javier Ontañón García Pimentel

## **Edición de memorias**

Dra. Marcela Mejía Carlos

Dr. Luis Felipe Lastras Martínez

Ing. Liliana del Carmen Mendoza Tello

| <b>Índice</b>                                                                                                                                                                                              | <b>Pág.</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1 <b>Sistema Embebido Evolutivo para el Seguimiento de Objetos en Video</b><br>Oscar E. Pérez-Cham, Carlos Soubervielle-Montalvo, Cesar Puente                                                             | 1           |
| 2 <b>Laboratorio remoto para el aprendizaje del lenguaje de descripción de hardware</b><br>Ramírez Quirino Ociel                                                                                           | 5           |
| 3 <b>I. Amplificador Lock-In Virtual</b><br>Esdras Terranova Azuara Juárez                                                                                                                                 | 9           |
| 4 <b>Selector Automático de Objetos por Color bluetooth</b><br>Citlali Guadalupe Hernández Juache                                                                                                          | 13          |
| 5 <b>Detección de Caídas Libre de Dispositivos utilizando Señales de Radiofrecuencia WiFi</b><br>Cárdenas J. Daniel, Gutiérrez Carlos A., Aguilar Ruth M.                                                  | 15          |
| 6 <b>Sistema de clasificación y reconocimiento aéreo en tiempo real de objetos texturizados</b><br>J.M. Fortuna-Cervantes, M. Mejía-Carlos, J.S. Murguía-Ibarra, M.T. Ramírez-Torres, J. Martínez-Carranza | 19          |
| 7 <b>Plantillas para cosechado de energía mecánica y su conversión a energía eléctrica por medio de generadores triboeléctricos</b><br>J. R. Moreno, Gabriel González, Francisco J. González               | 23          |
| 8 <b>Micro-espectrómetro de reflectancia diferencial basado en un PMT de 64 canales: materiales policristalinos</b><br>L. Rodríguez Salas, Alfonso Lastras Martínez, Óscar Núñez Olvera                    | 27          |
| 9 <b>Visualización de interferencia en ritmos y frecuencias audibles. Aproximación desde el arte</b><br>Iván Manuel Beltrán Loredó                                                                         | 31          |



# Sistema Embebido Evolutivo para el Seguimiento de Objetos en Video

Oscar E. Pérez-Cham  
Universidad Autónoma de San Luis  
Potosí, Facultad de Ingeniería  
S. L. P., México  
operezcham@gmail.com

Carlos Soubervielle-Montalvo  
Universidad Autónoma de San Luis  
Potosí, Facultad de Ingeniería  
S. L. P., México  
carlos.soubervielle@uaslp.mx

Cesar Puente  
Universidad Autónoma de San Luis  
Potosí, Facultad de Ingeniería  
S. L. P., México  
cesar.puente@uaslp.mx

**Resumen**—El presente trabajo describe el diseño, implementación y evaluación de un sistema embebido evolutivo para realizar el seguimiento de objetos en video, basado en una plataforma SoC-FPGA y una metaheurística llamada HSA, que combina los enfoques de Cómputo Evolutivo e Inteligencia de Enjambre. Se emplea la medida de semejanza de ZNCC como función objetivo del HSA. Los resultados muestran que la combinación de SoC-FPGA, HSA y ZNCC reducen el uso de recursos computacionales y consumo de energía, permitiendo el multiprocesamiento en tiempo real sin reducción de la exactitud. El sistema embebido evolutivo que se propone para el seguimiento de objetos en video tiene potenciales aplicaciones en diferentes áreas como son: la robótica, tecnología para vehículos no tripulados, tecnología para drones, automatización de procesos mediante visión artificial, entre otros.

**Palabras Clave**—SoC-FPGA, HSA, embebido, evolutivo

## I. INTRODUCCIÓN

El problema de seguimiento de objetos en video consiste en localizar dentro de una secuencia de cuadros de imagen objetos de interés previamente definidos. Actualmente el enfoque principal de la comunidad de visión por computadora es mejorar la exactitud de los algoritmos propuestos para resolver dicho problema [1]. Sin embargo, con el avance en tecnologías para el desarrollo de sistemas de alto desempeño como son los dispositivos GPU (*Graphics Processing Unit*) y FPGA (*Field-Programmable Gate Array*) existe la posibilidad de ahorrar recursos computacionales, tiempo y energía, que se requieren para ejecutar los algoritmos de seguimiento de objetos. Por otro lado, el uso de metaheurísticas permite aprovechar de manera eficiente los recursos computacionales disponibles. Una metaheurística se define como un método para encontrar una solución subóptima a un problema por medio de una exploración dirigida del espacio de búsqueda [2]. En este trabajo se presenta el diseño, implementación y evaluación de un sistema embebido evolutivo para el seguimiento de objetos en video, basado en SoC-FPGA (*System-on-Chip FPGA*), empleando la metaheurística HSA (*Honeybee Search Algorithm*) y una medida de semejanza simple llamada ZNCC (*Zero Mean Normalized Cross-Correlation*).

A continuación, se mencionan algunos datos relevantes sobre las tecnologías y métodos empleados, así como la justificación de la selección de estos. HSA se inspira en la forma en que una población de abejas (animales sociales) se coordina para buscar sustento de forma eficiente [3]. Se eligió

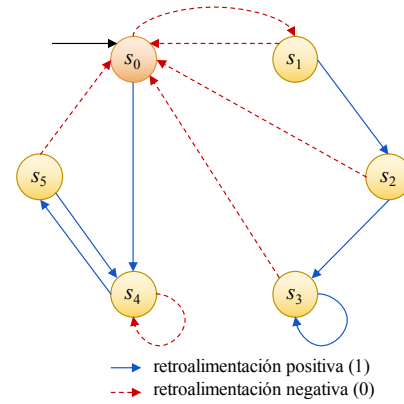


Fig. 1. Diagrama de estados del autómata usado para estudiar el flujo de los individuos en HSA. Las transiciones posibles entre los estados se representan con flechas. La Tabla I muestra el nombre de los estados y la función de transición.

esta metaheurística por su enfoque dirigido a los problemas de visión. Para facilitar la implementación en sistemas de alto desempeño, esta metaheurística se describió usando un autómata [4], lo cual permite analizar cuales partes de la ejecución podrían paralelizarse (Fig. 1 y Tabla I). Los estados del autómata corresponden con las fases principales de HSA y su estudio permitió determinar que los estados con una mayor demanda computacional son los de exploración y recolección de las abejas artificiales, que tienen en común evaluar la función objetivo varias veces. Se usa ZNCC como la función objetivo para HSA, que permite medir la semejanza entre dos imágenes o subsecciones de estas [5]. Esto nos da una regla o medición que nos permite establecer qué región de una imagen tiene una mayor semejanza a cierto objeto de interés. El SoC-FPGA es una plataforma de HW/SW que permite trabajar con CPU y FPGA pero que permite una comunicación más rápida y eficiente entre los componentes gracias a que se encuentran en el mismo chip [6].

TABLA I. FUNCIÓN DE TRANSICIÓN DEL AUTÓMATA.

| Estado Actual         | Siguiete Estado                |                                |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                       | Retroalimentación negativa (0) | Retroalimentación positiva (1) |
| Inactividad ( $s_0$ ) | Exploración ( $s_1$ )          | Recolección ( $s_4$ )          |
| Exploración ( $s_1$ ) | Inactividad ( $s_0$ )          | Exploración exitosa ( $s_2$ )  |

|                               |                       |                               |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Exploración exitosa ( $s_2$ ) | Inactividad ( $s_0$ ) | Reclutamiento ( $s_3$ )       |
| Reclutamiento ( $s_3$ )       | Inactividad ( $s_0$ ) | Reclutamiento ( $s_3$ )       |
| Recolección ( $s_4$ )         | Recolección ( $s_4$ ) | Recolección exitosa ( $s_5$ ) |
| Recolección exitosa ( $s_5$ ) | Inactividad ( $s_0$ ) | Recolección ( $s_4$ )         |

La representación formal del HSA mediante un autómata ha facilitado el diseño e implementación de un sistema embebido basado en SoC-FPGA para el seguimiento de objetos en video. Los beneficios observados al aprovechar este tipo de plataformas en combinación con metaheurísticas son ahorros en términos de recursos computacionales, consumo energético, la posibilidad de una solución embebida y el procesamiento en tiempo real.

## II. DISEÑO DEL SISTEMA

Las plataformas de tipo SoC-FPGA se conforman por dos componentes de alto nivel que se encuentran físicamente en el mismo chip, la parte PL (*Programmable Logic*) que permite emular un diseño electrónico descrito; y la parte PS (*Processing System*) que contiene un procesador de dos núcleos convencional. En este caso, se tomó la decisión de realizar ciertas tareas de HSA en la parte PS y otras en la parte PL, dependiendo de la ganancia esperada al paralelizar. El autómata y análisis de complejidad computacional de [4] permite llegar a la conclusión de que la evaluación de la función de aptitud (ZNCC) es en realidad la parte que provoca los mayores costos y además puede ser paralelizada de forma más intuitiva. Debido a ello, las tareas de HSA que están relacionadas con la toma inteligente de decisiones coordinadas se realizan en la parte PS, mientras que la parte PL se enfoca en la evaluación de ZNCC como se ilustra en la Fig. 2.

Otro detalle importante es que la comunicación entre PS y PL se da por medio de una interfaz de alto rendimiento llamada AXI (*Advanced eXtensible Interface*) que es específica para arquitecturas SoC con procesadores de tipo ARM [7]. Además, hay que destacar que el diseño electrónico implementado en la PL se divide en dos componentes importantes: las Unidades de Control y el *Datapath* (unidades de procesamiento). La paralelización se da en este sistema gracias a que el *Datapath* contiene 4 unidades dedicadas a realizar las operaciones aritméticas y lógicas necesarias para el cómputo del ZNCC, cada una de las cuales se enfoca en una región diferente de la imagen que se explora.

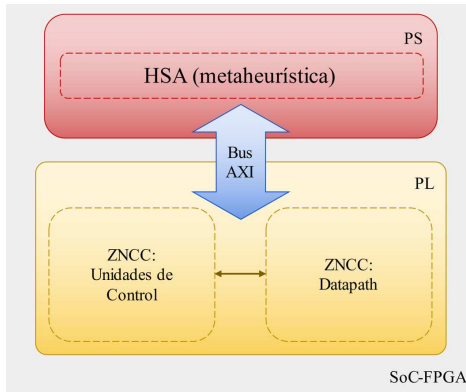


Fig. 3. Diagrama de alto nivel del sistema basado en SoC-FPGA que se propone para realizar el seguimiento de objetos en video usando HSA y ZNCC. Los componentes fijos se muestran con línea sólida y los componentes flexibles en línea punteada.

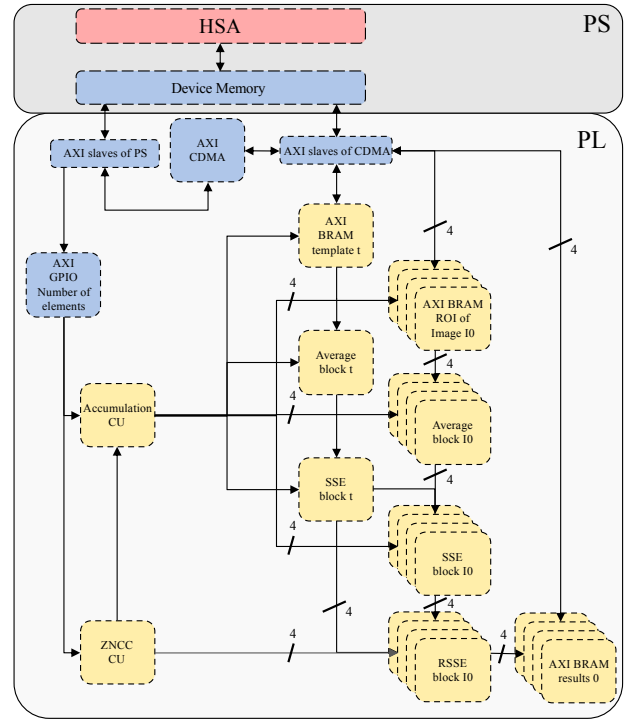
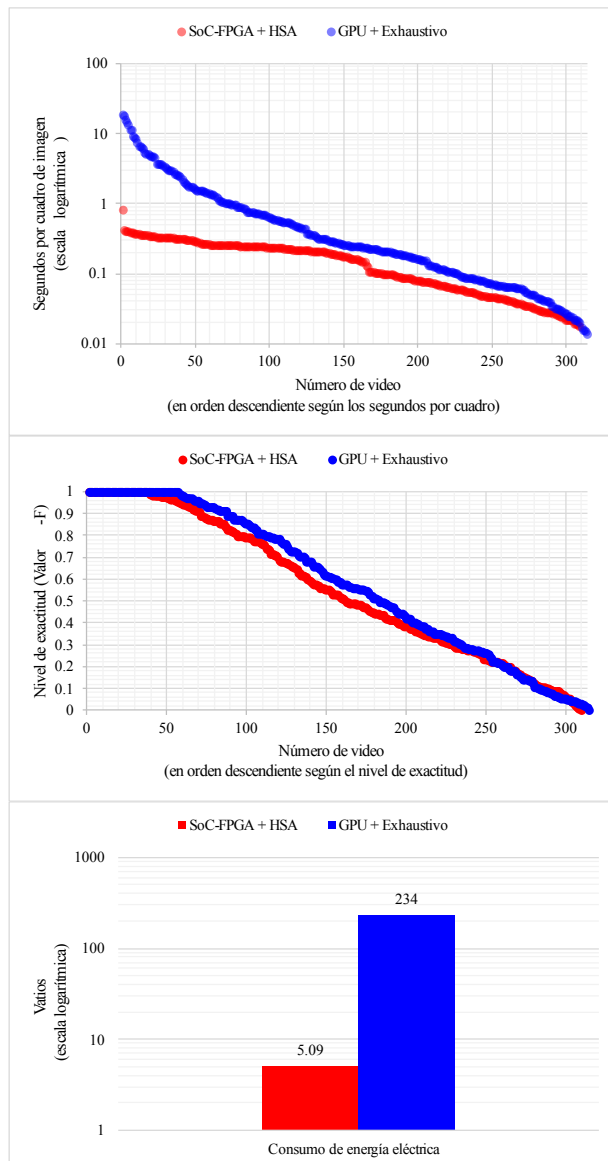


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema propuesto. Hay 4 unidades de procesamiento paralelo encargadas de calcular ZNCC. La comunicación entre PS y PL es por medio de AXI y DMA.

Cada una de las 4 unidades paralelas contiene 3 bloques principales que trabajan para analizar la información de color asociada a los píxeles que se encuentran en las regiones de la imagen que se procesan en ese momento. Esos bloques se encargan de obtener 3 medidas estadísticas necesarias para el cálculo de ZNCC: la media, la suma de errores cuadrados, y la raíz de la suma de errores cuadrados. Las sumatorias que se usan para obtener la media y la suma de errores cuadrados son operaciones inherentemente secuenciales por lo que se diseñó una máquina de estados finita que se encarga de repetir la operación básica de acumulación hasta que se cumpla la condición de haber procesado todos los píxeles en la región de interés. Las operaciones aritméticas como sumas y restas son implementadas usando la lógica programable de la PL, pero las multiplicaciones (cuadrados) son operaciones relativamente más complejas que usaron otros recursos conocidos como DSPs (*Digital Signal Processors*). Hay una segunda máquina de estados finita que se encarga de controlar el flujo general del proceso: primero se obtiene la media, después la suma de errores cuadrados y finalmente la raíz de esa suma se usa para obtener el valor de ZNCC. El último bloque (raíz de la suma) debe realizar dos operaciones aritméticas que son de mayor complejidad en términos de hardware: división y raíz cuadrada por lo que el diseño usa *soft IP cores* que resuelven esas operaciones de forma eficiente con los recursos disponibles. Una nota importante es que cada valor de ZNCC que se obtiene usando este sistema está discretizado como un número entero entre 0 y  $2^{16}$ . El rango original de ZNCC es de  $-1$  a  $1$  pero en este caso se ignoran los valores de  $-1$  a  $0$ , que indican que el objeto no es semejante, lo que permite ahorrar recursos computacionales. En la Fig. 3, se muestra el diagrama a bloques del diseño del sistema detallado previamente. Se puede observar que la comunicación de las partes PS y PL del sistema se realiza



### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de la efectividad de este sistema se consiguió utilizando el *benchmark* de ALOV (*Amsterdam Library of Ordinary Videos*) que provee 314 videos diferentes junto con archivos de anotación que indican la ubicación real del objeto de interés [8]. ALOV también propone un método

para calificar el desempeño conocido como el valor-F (o *F-score*) que se basa en la cuenta de falsos positivos, verdaderos positivos y falsos negativos. Además, los autores de ALOV también recomiendan el uso de gráficas de curvas de supervivencia que permiten una visualización sencilla de las tendencias que surgen al usar un número considerable de muestras para evaluar. Las curvas de supervivencia se obtienen al ordenar todos los datos de mayor a menor según la variable de interés (el eje vertical) antes de graficar en un plano cartesiano.

Los resultados de la prueba con todos los videos (Fig. 4) demuestran que el sistema propuesto tiene el mismo nivel de exactitud que una propuesta similar que se ejecuta usando GPU y que hace un barrido exhaustivo en vez de usar una metaheurística [9]. Sin embargo, al comparar los tiempos de ejecución y el consumo eléctrico de los dispositivos, se observan ahorros importantes que tienen su origen en el uso de SoC-FPGA y HSA. Se concluye que a pesar de que dispositivos como el GPU tienen una capacidad de procesamiento considerable, es posible que ciertos problemas (como el seguimiento de objetos en video) se resuelvan de manera más eficiente usando plataformas de mayor flexibilidad (como SoC-FPGA) y usando técnicas de búsqueda inteligente (como HSA).

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recibió apoyo económico de CONACYT...

### REFERENCIAS

- [1] M. Kristan, A. Leonardis, J. Matas, M. Felsberg, R. Pflugfelder, J.-K. Kamarainen, M. Danelljan, L.C. Zajc, A. Lukežić, O. Drbohlav *et al.*, “Theeighth visual object tracking VOT2020 challenge results,” in *European Conference on Computer Vision*. Springer, 2020, pp. 547–601.
- [2] A. Chakraborty and A.K. Kar, “Swarm intelligence: A review of algorithms,” *Nature-Inspired Computing and Optimization*, pp. 475–494, 2017.
- [3] G. Olague and C. Puente, “Parisian evolution with honeybees for three-dimensional reconstruction,” in *Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, 2006, pp. 191–198.
- [4] O.E. Perez-Cham, C. Puente, C. Soubervielle-Montalvo, G. Olague, F.-E. Castillo-Barrera, J. Nunez-Varela, and J. Limon-Romero, “Automata design for honeybee search algorithm and its applications to 3D scene reconstruction and video tracking,” *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 61, p. 100817, 2021.
- [5] M. Batz, T. Richter, J.-U. Garbas, A. Papst, J. Seiler, and A. Kaup, “High dynamic range video reconstruction from a stereo camera setup,” *Signal Processing: Image Communication*, vol. 29, no. 2, pp. 191–202, 2014.
- [6] A. Bean, “Improving memory access performance for irregular algorithms in heterogeneous CPU/FPGA systems,” Ph.D. dissertation, Imperial College of Science, 2016.
- [7] ARM, *AMBA AXI and ACE Protocol Specification*, 2011.
- [8] A.W. Smeulders, D.M. Chu, R. Cucchiara, S. Calderara, A. Dehghan, and M. Shah, “Visual tracking: An experimental survey,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 36, no. 7, pp. 1442–1468, 2013.
- [9] O.E. Perez-Cham, C. Puente, C. Soubervielle-Montalvo, G. Olague, C.A. Aguirre-Salado, and A.S. Nunez-Varela, “Parallelization of the honeybee search algorithm for object tracking,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, p. 2122, 2020.



# Laboratorio remoto para el aprendizaje del lenguaje de descripción de hardware

Ramírez Quirino Ociel, Técnico Laboratorista, Laboratorio de Mecatrónica  
Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
A262169@alumnos.uaslp.mx

**Resumen-** El objetivo de este proyecto es ser una alternativa para que los alumnos del laboratorio de diseño de sistemas digitales puedan trabajar de forma remota con el equipo de laboratorio para comprobar el funcionamiento de sus prácticas. Mediante el uso de tecnología existentes que permitan su manipulación de forma remota.

## I. INTRODUCCIÓN

La situación actual con la pandemia de SARS-CoV-2 ha provocado cambios en el proceso de enseñanza-aprendizaje, pues tanto los alumnos como los profesores deben adaptarse a estas condiciones.

En el Laboratorio de Diseño de Sistemas Digitales surgió la necesidad de plantear una solución a un problema, pues el 66% de las prácticas que se realizan usan el lenguaje de descripción de hardware (VHDL). El funcionamiento de estas se comprueba mediante el uso de la tarjeta de desarrollo Nexys 3, la cual tiene un elevado costo, que posiblemente los alumnos no pueden solventar.

Es por ello que se desarrolló un proyecto en el que se usan varias herramientas tecnológicas existentes, para que de esta forma los alumnos puedan tener un acceso remoto con la tarjeta y así verificar el funcionamiento de sus proyectos a distancia.

Aprovechando una de las mejores características de la tarjeta como lo es su contador en 100 MHz (mega-hercios)[1], usamos este componente para generar un proyecto con un contador el cual simula el cambio de estado de los dip-switch de la tarjeta, en una variable, para que el propio alumno pueda visualizar la posición actual del contador, este dato se refleja en un display de siete segmentos, el cual muestra en numeración decimal o hexadecimal la posición actual (esto dependiendo de la práctica que se este desarrollando).

Aunado a ello se hace uso de software adicional que permite a los alumnos un acceso remoto con la tarjeta y así verifiquen el funcionamiento de sus proyectos a distancia y así evitar que tengan que presentarse al laboratorio durante las circunstancias presentes.

## II. LABORATORIO REMOTO

En el laboratorio de diseño de sistemas digitales se les enseña a los alumnos a usar componentes eléctricos que les ayudan a comprender el funcionamiento de estos y complementa su clase teórica, además de ello aprende a hacer uso del lenguaje de descripción de hardware, el cual está presente en la mayoría de las prácticas a realizar.

Para ello tanto de forma presencial como remota se hace uso del programa Xilinx, el cual sirve para programar una FPGA (field programmable gate array o matriz de compuertas programables), mediante el lenguaje de descripción de hardware de sus siglas en inglés VHDL (Verilogic Hardware Description Language), el cual se configura en el hardware o FPGA que se haya adquirido, siendo nuestro caso la Nexys 3. Además de ello hacemos uso del programa Digilent Adept el cual permite programar la tarjeta en base al archivo generado por Xilinx.

El software de Xilinx es proporcionado a los alumnos (o ellos lo pueden descargar de su página oficial donde basta con un simple registro para obtener una licencia que, pese a ciertas limitaciones, nos permite desarrollar todas las prácticas del laboratorio). Lo cual les permite modificar el código en sus propios equipos y solo verificar su funcionamiento hacen uso de una computadora del laboratorio la cual tiene instalada una cámara que les muestra la tarjeta Nexys, donde pueden observar el comportamiento de su práctica y de esta forma comprobar el funcionamiento de esta.

Con ello surge uno de los principales problemas del laboratorio remoto, pues se tiene una cantidad limitada de computadoras para que ellos puedan conectarse a cualquier hora del día, por lo que se diseñó una hoja de cálculo, la cual solo puede ser modificada por los instructores, para que los alumnos seleccionan el horario que más pueda acoplarse para sus comprobaciones y de esta manera evitamos provocar más contagios al mantener el distanciamiento social que hoy en día es requerido.

Los laboratorios remotos a diferencia de los virtuales permiten a los usuarios una mayor interacción pues permiten una manipulación de los componentes [2], a diferencia de las virtuales las cuales simulan los componentes. Pero como se mencionó con anterioridad su principal problema es su limitación al total de equipos disponibles, por lo que se debe programar un horario para su uso.

Pese a estas dificultades, no cabe duda de que el laboratorio remoto permite reafirmar los conocimientos de los estudiantes, al poder comprobar sus resultados en equipos físicos y no solo ello pues permite a los instructores revisar de manera más efectiva lo que realizan los alumnos, pues en la mayoría de las ocasiones se necesitaba revisar, cada línea de código. Este cambio se refleja de manera clara, ya que los alumnos de esta manera pueden revisar si realmente funciona su práctica, a diferencia de otros semestres donde, la tarjeta no mostraba el resultado esperado, pese a que el código fuese correcto, por lo que el instructor debía analizar las líneas de código buscando

los errores lógicos que pudiesen presentarse e informarles de ello a los alumnos.

### III. DISEÑO DEL LABORATORIO REMOTO

Antes de comenzar este diseño recién implementado se buscaron opciones y que tuviesen el menor coste posible, una de esas opciones fue el software de Tina, donde con anterioridad se cargaba el código, pero se presentaban una serie de limitaciones, que solo permitían a los alumnos hacer uso de él durante las dos primeras prácticas, ya que el programa limitaba sus funciones en la versión gratuita. Además de ciertas características de este, que complicaban más el código para que pudiese ser programado con éxito.

Esto y el hecho de que los estudiantes no tenían una experiencia con la tarjeta, nos hicieron buscar una nueva forma, que se acercase lo más posible al laboratorio presencial.

Las prácticas que se realizan en el laboratorio pueden ser armadas en una tablilla de pruebas (Protoboard) o de código (VHDL), siendo más predominantes estas últimas, abarcando el 66% de las practicas, donde semestres anteriores solo el 25% de ellas, los estudiantes podían comprobar su funcionamiento. Aumentando así el trabajo tanto de alumnos como de instructores, pues constantemente se debía enviar el código a revisión y el instructor al revisar debía de revisar la ejecución del programa en la tarjeta y retornarlo si existía un error, del cual el estudiante debía hacerse cargo y enviar nuevamente a revisión, al no haber un sistema en el que él pudiese observar el trabajo que realizo y si su ejecución fuese correcta. El alumno en cuestión interactúa con la FPGA, por medio de un contador que simula los botones de un dip switch (esto dependiendo de la práctica a realizar), y mientras los alumnos se acostumbran al entorno, solo se les explica lo esencial para que su práctica pueda funcionar y no se confundan con explicaciones complicadas, pues son temas que se verán poco a poco.

Para usar remotamente la computadora del laboratorio se exploraron algunas opciones, una de ellas fue el software que viene por defecto en Windows (conexión a escritorio remoto), el cual fue descartado inmediatamente pues las computadoras requerían estar conectadas a la misma red de internet, se consultaron otros programas pero estos requerían modificar la red de la universidad, por lo que también se descartó su uso, así como los programas comerciales, pero encontramos un programa que se adaptaba perfectamente a las condiciones requeridas y ese fue el escritorio remoto de Chrome [3], el cual se configuro de forma que su acceso fuese lo más intuitivo para los estudiantes y que se les pudiese explicar de una forma sencilla.

Para que los alumnos pudiesen observar los resultados que entregaba la tarjeta de desarrollo, se hizo de una cámara que apuntaba hacia ella y una vez programada por los alumnos, ejecutaría las instrucciones que le hicieron llegar en el código. Mostrando así los alumnos el funcionamiento de la FPGA.

### IV. TARJETA DE DESARROLLO NEXYS 3

La tarjeta de desarrollo Nexys 3 [1] es una plataforma para el desarrollo de circuitos digitales basada en la FPGA Spartan-6 LX16 de Xilinx, la cual proporciona una gran capacidad y

desempeño. La tarjeta (Fig. 1) cuenta con componentes comunes que los alumnos pueden identificar. Además de pines que permiten enviar señales a una tablilla de conexiones y sobre todo cuenta con una de característica fundamental para el desarrollo de las prácticas un cristal oscilador de 10 MHz y cuatro display de siete segmentos donde uno será utilizado para que se pueda observar la posición actual de los dip switch simulados. Por medio de la declaración de entradas/salidas de la FPGA se puede seleccionar que elementos se usarán en el estado actual, esto a medida que avanza el curso lo entenderán los alumnos.

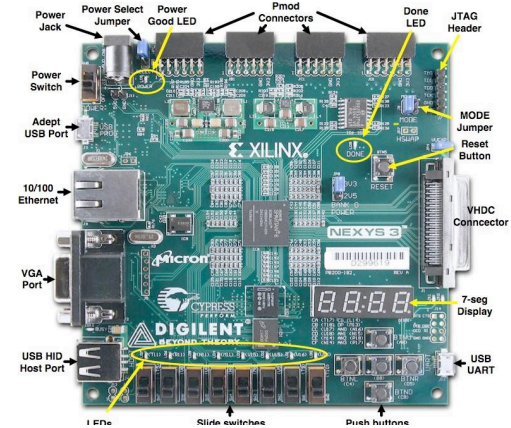


Fig. 1 Tarjeta de desarrollo Nexys 3, Digilent, 2016, Nexys 3 Board Reference Manual

Para cada práctica se desarrolló un código distinto (Fig. 2 y 3), dependiendo de las condiciones de esta, ejemplo: para la práctica del conversor de bcd a siete segmentos se sustituyen los valores que encienden en el display, por el lenguaje binario o en prácticas como el contador ascendente y descendente (para mayor información de los códigos consultar el siguiente enlace: <https://docs.google.com/document/d/16qECfUHLRcRKK5EQg1V1c8WR1oCwVYvG9GLqK9Ksnw/edit?usp=sharing>).

Fig. 2 y 3 Código implementado para la práctica de funciones en VHDL

Hasta la fecha actual se han adaptado al formato remoto el 75% de las prácticas, aunque de momento se esta buscando la forma de implementarlas, estas son la unidad lógica aritmética (ALU) y la memoria RAM, las cuales requieren de una mayor interacción con la tarjeta, por lo cual se esta buscando la forma de implementarlas y se espera que al menos la ALU, pueda adaptarse a este formato.

Como se mencionó con anterioridad, se usa el escritorio remoto de Chrome que permite usar el equipo en tiempo real así al hacer uso de una webcam, la cual se utiliza mediante la aplicación de Windows cámara, esta apunta hacia la tarjeta de desarrollo Nexys, la cual solo debe ser programada mediante el uso del programa Digilent Adept, una vez hecho esto se podrá visualizar lo programado en pantalla y comprobar que el funcionamiento es el correcto (Fig. 4 y 5).

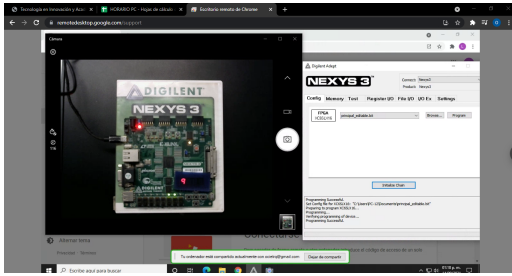


Fig. 4 Acceso remoto a escritorio desde el navegador de Chrome.

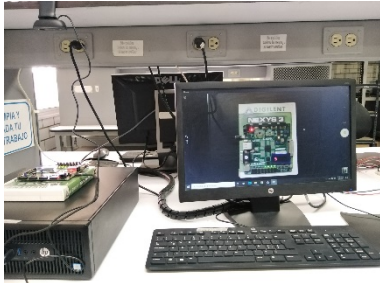


Fig. 5 Organización del equipo para el laboratorio remoto dentro de la universidad

## V. ACCESO AL LABORATORIO REMOTO

Uno de los principales problemas del laboratorio remoto se presentó en la configuración de red de la universidad que evitaba usar algún software que nos permitiese conectarnos al equipo de manera remota, se realizaron pruebas con distintos programas, pero la mayoría de ellos requería una modificación de seguridad de la red o debían estar conectados los equipos a la misma red, este problema se pudo solventar con el escritorio remoto de Chrome, del cual solo requerimos realizar una cuenta de correo electrónico para el uso de esta herramienta, evitando de esta forma solicitar un cambio en la configuración de la red de la universidad, ahorrando tiempo.

Este correo y contraseña son compartidos con los alumnos, para evitar que se necesite una comprobación de usuario, ya que el laboratorio esta compuesto por 102 alumnos, donde se tiene que compartir el equipo para que puedan verificar su práctica, al ser tantos estudiantes el que el instructor deba darles acceso, hace que la tarea sea ardua, pues la cantidad de equipos esta limitada a los que tenemos en el laboratorio y aun más al también estar compartidos estos con otros dos laboratorios en este mismo.

Es por ello que a su vez se desarrollo una hoja de cálculo donde cada instructor es el encargado de dar de alta a los alumnos en el horario que ellos establecen, y al tener un registro sabemos quien ocupa los equipos en esos tiempos, podemos identificar de manera rápida al que maneja el equipo, así si detectamos alguna anomalía nos ponemos en contacto con él.

## VI. CONCLUSIONES

Con la información presentada anteriormente podemos demostrar que el uso de los laboratorios remotos permite a los estudiantes un aprendizaje más óptimo, puesto que les da acceso a los instrumentos de laboratorio lo que les permite comprobar,

entender y experimentar los conceptos aprendidos en el laboratorio y la clase teórica, lo que desarrollara sus habilidades.

Como se podrá notar a lo largo del documento hemos mencionado cada uno de los problemas que se ha presentado a lo largo del desarrollo del proyecto, y para cada uno de ellos hemos propuesto una solución que permita a los estudiantes trabajar de una forma accesible y fácil para cada uno de ellos, pues la mayoría de los equipos cuentan con un navegador de internet, con lo que con cualquier computadora, pueden acceder remotamente a la de la universidad y comprobar su trabajo desde cualquier lugar en el que se encuentren.

De esta manera nos adaptamos a las condiciones de distanciamiento social que la pandemia por SARS-CoV-2 ah provocado, con lo que evitamos poner en una situación de riesgo a los alumnos.

## REFERENCIAS

- [1] Nexys 3 FPGA Board Reference Manual, Digilent, Revised April 2016 Available: [https://digilent.com/reference/\\_media/reference/programmable-logic/nexys-3/nexys3\\_rm.pdf](https://digilent.com/reference/_media/reference/programmable-logic/nexys-3/nexys3_rm.pdf)
- [2] Los laboratorios virtuales y laboratorios remotos en la enseñanza de la ingeniería, Revista Internacional de educación en ingeniería. Disponible: [https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Lorandi-Medina/publication/267302003\\_Los\\_Laboratorios\\_Virtuales\\_1\\_y\\_Laboratorios\\_Remotos\\_en\\_la\\_Ensenanza\\_de\\_la\\_Ingenieria/links/598f47c8458515b87b443b5b/Los-Laboratorios-Virtuales-1-y-Laboratorios-Remotos-en-la-Ensenanza-de-la-Ingenieria.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alberto-Lorandi-Medina/publication/267302003_Los_Laboratorios_Virtuales_1_y_Laboratorios_Remotos_en_la_Ensenanza_de_la_Ingenieria/links/598f47c8458515b87b443b5b/Los-Laboratorios-Virtuales-1-y-Laboratorios-Remotos-en-la-Ensenanza-de-la-Ingenieria.pdf)
- [3] Como acceder a otra computadora con el escritorio remoto de Chrome, Ayuda de Google Chrome. Disponible: <https://support.google.com/chrome/answer/1649523?hl=es-419&co=GENIE.Platform%3DDesktop>



# Amplificador Lock-In Virtual

Esdras Terranova Azuara Juárez  
 Instituto de Investigación en Comunicación Óptica  
 Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
 San Luis Potosí, México  
 a199318@alumnos.uaslp.mx

**Resumen**—El presente trabajo describe la implementación virtual de un amplificador lock-in, utilizando el software LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos PICE-6353 de National Instruments. Se obtuvo un instrumento que tiene un desempeño similar a un equipo comercial, y que puede amplificar señales sumergidas en ruido con una amplitud hasta 100 veces más grande que la señal que se busca medir.

**Palabras Clave**—National Instruments, LabVIEW, PICE-6353, instrumentación virtual, amplificador lock-in

## I. INTRODUCCIÓN

Los amplificadores lock-in (LIA, por sus siglas en inglés) son instrumentos capaces de extraer señales en ambientes extremadamente ruidosos. Emplean un esquema de detección de homodino y filtrado de paso bajo para medir la amplitud y fase de una señal en relación con una referencia periódica. Una medición de este instrumento obtiene señales en una banda definida alrededor de la frecuencia de referencia, rechazando eficientemente todos los demás componentes de frecuencia. Por su versatilidad, han encontrado uso en diversos campos de estudio, como la observación de la corona en un día soleado [1], la medición del efecto Hall cuántico fraccionario [2], o tomar imágenes directas de las características de enlace entre los átomos en una molécula [3]. Es indiscutible la utilidad de los LIA en diferentes laboratorios, por lo que a menudo es necesario contar con uno para experimentos, sin embargo son instrumentos que llegan a ser muy costosos y difíciles de reparar, es de ahí que surge la necesidad de crear un amplificador lock-in de bajo costo y que al conocer los por menores del diseño sea fácil darle mantenimiento. En este documento se describirá brevemente el principio de funcionamiento de un LIA, el diseño del amplificador implementado en LabVIEW, los resultados obtenidos y las conclusiones.

## II. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Aunque los amplificadores lock-in pueden ser muy complejos y conformarse de muchas partes, se puede identificar al menos dos componentes cruciales, el primero es un multiplicador de señales, y el segundo es un filtro paso bajo que entrega una amplitud DC perteneciente a la señal medida, lo anterior se puede observar en la figura 1. El trabajo del multiplicador es esencialmente mezclar la señal a medir que se encuentra abrumada por ruido y la señal de referencia, esto matemáticamente se expresa en la ecuación 1.

$$V_{mult}(t) = V_m V_r \sin(\omega_m t + \theta_m) \sin(\omega_r t + \theta_r) \quad (1)$$

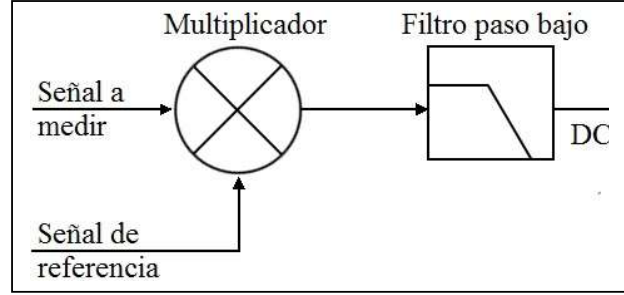


Figura 1. Esquema de un amplificador lock-in.

Usando la identidad trigonométrica para la multiplicación de senos, llegamos a la ecuación 2.

$$V_{mult}(t) = \frac{1}{2} V_m V_r \cos([\omega_m - \omega_r]t + \theta_m - \theta_r) - \frac{1}{2} V_m V_r \cos([\omega_m + \omega_r]t + \theta_m + \theta_r) \quad (2)$$

Es fácil ver gracias a la anterior expresión que, si la frecuencia de ambas señales es la misma, esencialmente nos quedamos con la suma de una señal que es independiente del tiempo y otra que va al doble de la frecuencia de referencia. Para eliminar el segundo término y obtener solamente la amplitud DC es necesario utilizar un filtro paso bajo, este nos conducirá a la ecuación 3.

$$V_{filtro} = \frac{1}{2} V_m V_r \cos(\theta_m - \theta_r) \quad (3)$$

Por último, para conocer la pequeña amplitud de la señal que se busca medir debemos despejar y llegar a la ecuación 4.

$$V_m = \frac{2V_{filtro}}{V_r \cos(\theta_m - \theta_r)} \quad (4)$$

## III. AMPLIFICADOR LOCK-IN EN LABVIEW

El LIA digitaliza la señal de referencia y la señal que se busca medir por medio de la tarjeta PICE-6353, después hace una multiplicación entre las señales y el resultado entra a un filtro paso bajo del cual podemos controlar su orden y frecuencia de corte. La salida del filtro es prácticamente el voltaje de DC que buscamos medir, a este le calculamos el error relativo porcentual si es que conocemos de antemano la amplitud de voltaje para caracterizar el instrumento.

El panel frontal del amplificador virtual lo podemos ver en la figura 2, donde se ve un experimento en el que se recupera una señal de 10 mV enterrada en un ruido 100 veces más grande.

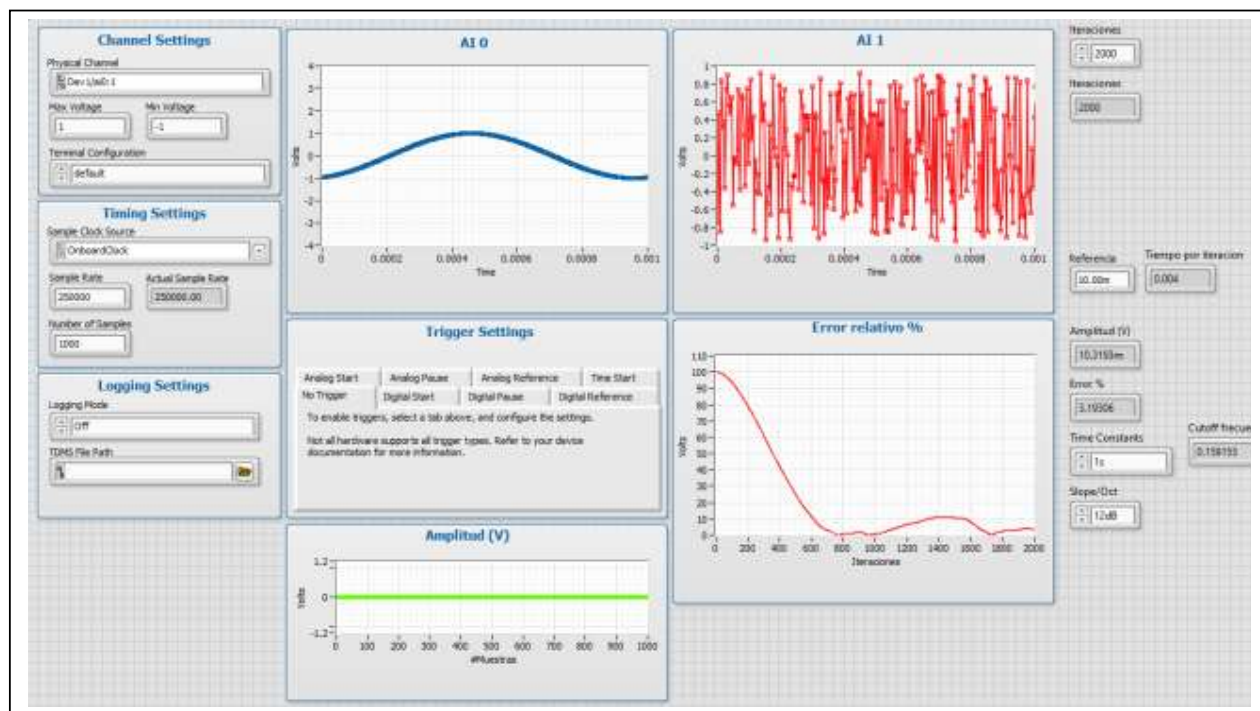


Figura 2. . Panel Frontal del instrumento virtual del Amplificador Lock-In.

#### IV. RESULTADOS

Para comparar el desempeño del amplificador virtual utilizamos un equipo comercial de Stanford Research Systems, el SR830DSP. Se utilizaron los mismos parámetros experimentales como la frecuencia de corte, el orden del filtro, y el tiempo de medición, en ambos amplificadores. En la figura 3, se puede observar el resultado arrojado de los instrumentos para una señal de 10mV que se encuentra opacada por ruido de 1V (100 veces más grande que la señal), es fácil ver que nuestro amplificador virtual representado por la línea azul y roja tiene un comportamiento similar al amplificador comercial, que las líneas no lleguen a un valor constante se lo atribuimos a la magnitud del ruido y que la señal se encuentra en el límite de digitalización de la tarjeta.

El resultado de un segundo experimento se muestra en la figura 4, pero ahora con una señal de 50mV sumergida en un ruido de 500mV (10 veces más grande que la señal), el desempeño de los amplificadores es prácticamente igual, la estabilidad de las líneas se da porque la amplitud del ruido no es tan alta en comparación a la señal, y que se tiene una mejor digitalización en 50mV.

Los anteriores resultados se obtienen con señales de una frecuencia de referencia de 1kHz, muestreadas a 250kHz, utilizando ruido blanco, mencionamos estos valores porque influyen en la calidad de la medición, por ejemplo, utilizar una frecuencia de referencia más alta, cercana a la frecuencia de muestreo la deterioraría. También si el ruido presente en la señal que buscamos medir fuera ruido rosa, este sería más intenso a bajas frecuencias, por lo que usar una frecuencia de referencia baja no sería recomendable.

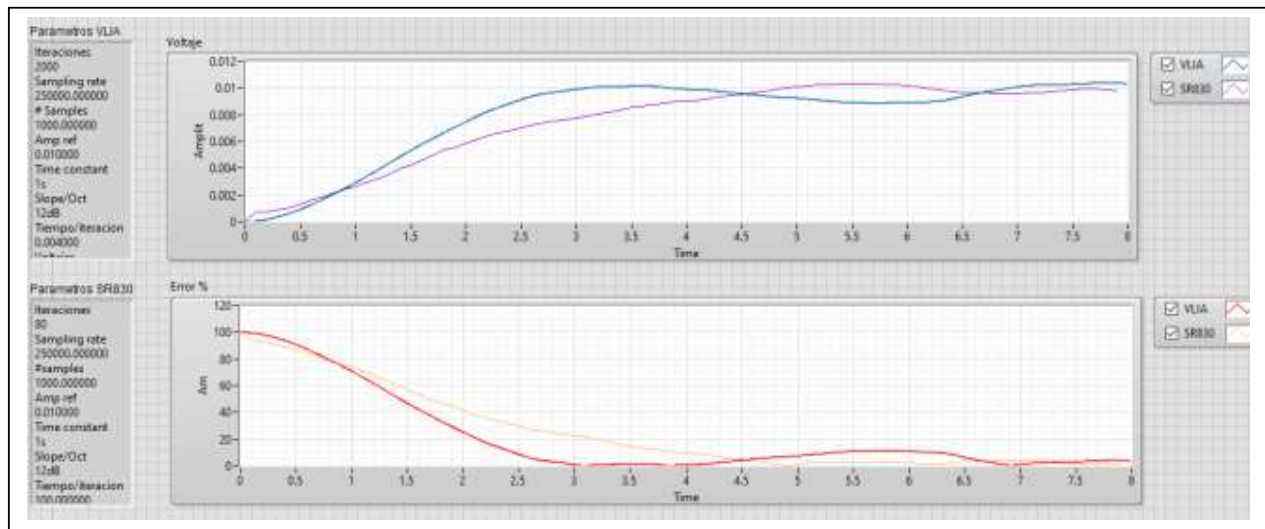


Figura 3. Comparación del experimento de la señal de 10mV en un ruido 100 veces más grande.

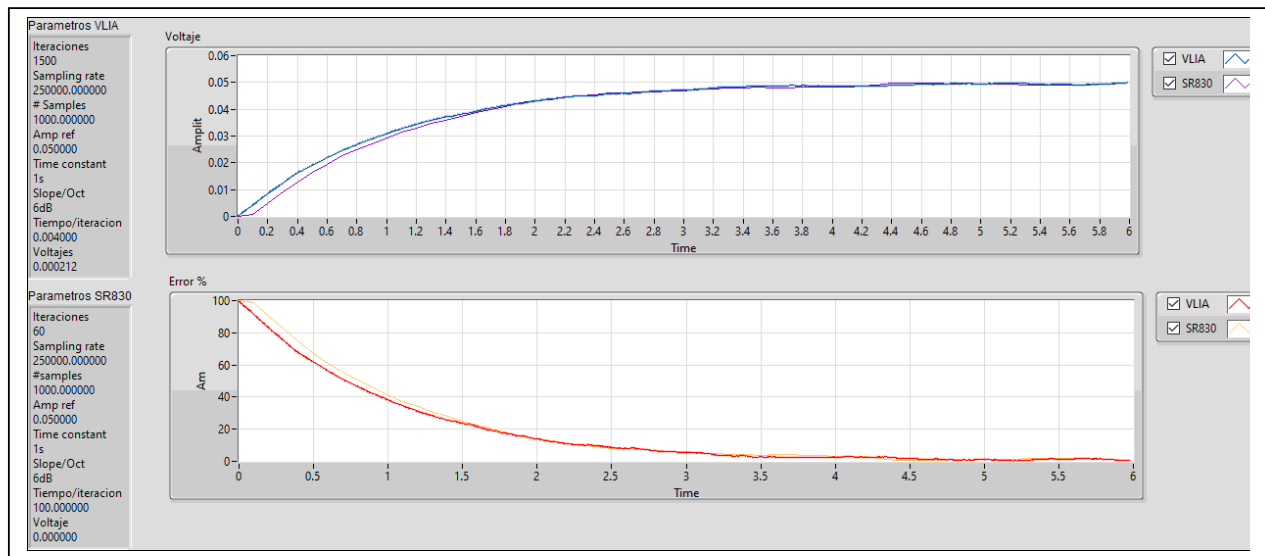


Figura 4. Comparación del experimento de la señal de 50mV en un ruido 10 veces más grande.

## V. CONCLUSIONES

Ya contamos con una implementación virtual de un amplificador lock-in que se desempeña como el instrumento SR830DSP, al menos en el rango de 1V a 10 mV con ruidos hasta 100 veces más grandes que la señal que se busca medir. Para comparar los instrumentos por debajo de los 10 mV es necesario generar un circuito electrónico que preamplifique la señal de entrada al lock-in, debido a que la señal sería tan pequeña que no entraría dentro del rango dinámico de digitalización. Adicionalmente también es necesario trabajar en otro circuito que nos permita generar señales de amplitudes por debajo de los 10mV.

## REFERENCIAS

- [1] A. Skellett, The coronaviser, an instrument for observing the solar corona in full sunlight, The Bell System Technical Journal 19, 249 (1940).
- [2] . Stormer, and A. C. Gossard, Twodimensional magnetotransport in the extreme quantum limit, Physical Review Letters 48, 1559 (1982).
- [3] L. Gross, F. Mohn, N. Moll, B. Schuler, A. Criado, E. Guitián, D. Peña, A. Gourdon, and G. Meyer, Bond-order discrimination by atomic force microscopy, Science 337, 1326 (2012).



# Selector Automático de Objetos por Color

Citlali Guadalupe Hernández Juache, Instituto de Investigación en Comunicación Óptica,  
Av Karakorum 1470, Lomas 4ta Sec., 78210 San Luis, S.L.P., México  
[CitlaliJuache21@gmail.com](mailto:CitlaliJuache21@gmail.com)

**Resumen—** Prototipo selector automatizado de objetos por color mediante el microcontrolador PIC16F877A programado en lenguaje ensamblador, detecta el color de los objetos a través una fotorresistencia para medir intensidad de voltaje reflejado del objeto. Después este valor llega al programa de control donde se hace la selección del color. Con un sistema de servomotores utilizando una señal PWM se procede a la ubicación de los objetos.

## I. INTRODUCCIÓN

Nuestro sistema consta de dos partes o Reconocimiento de color o Giro de motor.

Para la primera parte del proyecto consta de una fotorresistencia conectada al convertidor análogo digital (ADC) del PIC16F877A el cual posee una resolución de 10 bits. Para clasificar los valores entregados por el módulo ADC, el microcontrolador lee el primero de 3 dígitos del valor en hexadecimal que corresponde a los 2 bits más significativos, el cual se almacena en el registro ADRESH; después, lee los 8 bits restantes del registro ADRESL. Los valores leídos se comparan con valores obtenidos experimentalmente del prototipo, los cuales funcionan como delimitadores y permiten determinar qué color es el que está censando la fotorresistencia.

La parte mecánica se realizó con dos servomotores. El primer servomotor es el encargado de recoger el objetivo para después colocarlo en la posición donde es censado para reconocer su color. Después un segundo motor es el encargado de dirigir la rampa hacia la posición establecida para cada color. Finalmente, el primer servomotor se dirige hacia la rampa dejando caer el objetivo y regresa a la primera posición para seguir con el mismo proceso.

A continuación, se presentarán algunos aspectos a considerar para el manejo de servomotores.

Los servomotores o servos, son dispositivos de accionamiento para el control de velocidad y posición. En su interior contiene un encoder conocido como decodificador que convierte el movimiento mecánico (giros del eje) en pulsos digitales interpretados por un controlador de movimiento. También utiliza un driver, que en conjunto forma un circuito diseñado para controlar posición, torque y velocidad

Podemos controlar los servomotores mediante modulación de ancho de pulso PWM a través de su cable de control. Hay un pulso mínimo, un pulso máximo y una frecuencia de repetición.

Los servomotores giran  $90^\circ$  en cualquier dirección, obteniendo un movimiento total de  $180^\circ$

El PWM enviado al motor determina la posición del eje, y se basa en la duración del pulso enviado a través del cable de control, el rotor girará a la posición deseada.

El servomotor espera ver un pulso cada 20 milisegundos (ms) y la longitud del pulso determinará hasta dónde gira el motor. Por ejemplo, un pulso de 1.5ms hará que el motor gire a la posición de  $90^\circ$ .

Si el tiempo es inferior a 1,5 ms, se mueve en sentido contrario a las agujas del reloj hacia la posición de  $0^\circ$ , y si el tiempo es superior a 1,5 ms, el servo girará en sentido de las agujas del reloj hacia la posición de  $180^\circ$  como se observa en la Figura 1.

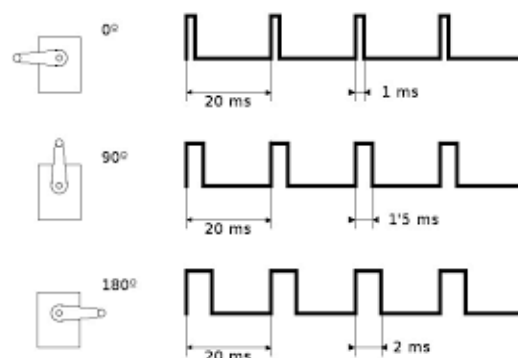


Figura. 1. Periodo de trabajo de servomotor para tres posiciones.  
<https://www.makerelectronico.com/servomotor-control-atmega/>

Cuando se les ordena a los servos que se muevan, estos se moverán a la posición y mantendrán esa posición. Si una fuerza externa empuja contra el servo mientras el servo mantiene una posición, el servo se resistirá a salir de esa posición.

## II. MATERIAL Y EQUIPO

Software MPLAB.

Tarjeta de desarrollo con microcontrolador PIC16F877A.

2 servomotores Sg90.

1 fotorresistencia

2 LEDS ultrabrillantes blancos

2 resistencias de 10k

### III. DESARROLLO

Para la lectura de la señal de la fotorresistencia, se configuró el módulo ADC determinando los pines de entrada analógica y digitales, la selección de justificación a la derecha del valor en los registros ADRESH y ADRESL y el temporizador para las lecturas como se muestra más adelante en la sección de *programa documentado*.

Se habilita la lectura de la fotorresistencia y, una vez terminada, se lee el registro ADRESH que contiene los dos bits más significativos de la lectura del ADC. De acuerdo con la tabla de valores límite de la Tabla 1, si este valor es igual a 0x02, se estaría detectando una ficha de color azul o que no hay ninguna ficha (normal); de no ser así, se trataría de una ficha verde o amarilla. Después se lee el valor del registro ADRESL que puede tener los siguientes casos, de acuerdo nuevamente con la Tabla 1:

- Si ADRESH tiene un 0x02 y la lectura de ADRESL da un valor menor que 0xD0, indica que no hay ficha sobre el detector. En cambio, si el valor es mayor, se estaría detectando una ficha azul.
- Si ADRESH tiene un 0x03 y la lectura de ADRESL da un valor menor que 0x22, indica que se detectó una ficha verde. En cambio, si el valor es mayor, se estaría detectando una ficha amarilla.

| LÍMITES        | VALORES DEL ADRESH | VALORES DEL ADRESL |
|----------------|--------------------|--------------------|
| NORMAL-AZUL    | 0x02               | 0xD0               |
| VERDE AMARILLO | 0x03               | 0x22               |

Tabla 1. Valores límite que delimitan la detección de colores a través del módulo ADC

Para el control de los motores se utilizó el timer0 con la idea de hacer temporizadores, uno para el tiempo de subida y otro el tiempo de bajada por lo que para realizar un giro a la posición de 0° se realizó un temporizador de 1ms que se puso en encendido y luego los restantes 19ms con otro temporizador para ponerlo en apagado con lo que finalmente tenemos la señal modulada con la que trabajan los servomotores.

En la Tabla 2 se muestran los valores de los temporizadores para cada posición que se encontraron calibrando el motor, notamos que la hoja de datos del servomotor dice que trabaja en un rango de 1ms – 2ms en encendido, pero con nuestros motores llegamos de 0.5ms como mínimo hasta 2.5ms como máximo.

| POSICION-SERVO | TIEMPO-ON (ms) | TIEMPO-OFF (ms) |
|----------------|----------------|-----------------|
| 0°             | 0.5            | 19.5            |
| 90°            | 1.5            | 18.5            |
| 180°           | 2.5            | 17.5            |

Tabla 2. Valores con lo que trabajamos en servomotor con distintas posiciones.

procesamiento se requiera convertir su señal en valores digitales.

Durante el proceso se encontraron diversos obstáculos, como que el módulo encargado para controlar señales PWM utilizando el timer2 del microcontrolador, no alcanzaba para generar señales de 20 ms de periodo, por lo que se tuvieron que utilizar interrupciones con el timer0 para este propósito.

### IV. CONCLUSIONES

Este proyecto nos permitió practicar el manejo del módulo convertidor analógico-digital, el cual es muy importante conocerlo ya que se utiliza en cualquier sensor que para su

# Detección de Caídas Libre de Dispositivos utilizando Señales de Radiofrecuencia WiFi

Cárdenas, J. Daniel, Gutiérrez, Carlos A. y Aguilar, Ruth M.  
j.cardenas@ieee.org  
Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

**Resumen—** La creciente población de adultos mayores que vive de forma independiente exige sistemas remotos para la monitorización de la salud. Las caídas se consideran eventos fatales recurrentes y, por lo tanto, se han convertido en un problema de salud mundial. Los sistemas de detección de caídas basados en señales de radiofrecuencia WiFi todavía tienen limitaciones debido a la dificultad para diferenciar las características de una caída de otras actividades similares. Además, la orientación de las antenas no se ha tenido en cuenta como un factor de influencia en el desempeño de la clasificación. Por lo tanto, presentamos en este trabajo un análisis del desempeño de la clasificación en relación a la orientación de las antenas y los efectos relacionados con la polarización y el patrón de radiación. Además, se muestra la implementación de una plataforma de detección de caídas libre de dispositivos para recopilar datos experimentales sobre caídas. La plataforma mide el espectro Doppler de una señal de sonda para extraer las firmas Doppler generado por el movimiento humano y cuyas características se pueden utilizar para identificar eventos de caída. El sistema explora la polarización de dos antenas: horizontal y vertical. La precisión alcanzada por la polarización horizontal es del 92% con una tasa de falsos negativos del 8%. La polarización vertical logró un 50% de precisión y de tasa de falsos negativos.

**Índice de Términos—** detección de caídas; libre de dispositivos; firmas Doppler; polarización; WiFi

## I. INTRODUCCIÓN

La mejora de la calidad de vida se ha traducido en un aumento de la esperanza de vida. En 2019, la población mayor de 65 años tuvo un crecimiento del 3% en comparación con 1990. La expansión poblacional proyectada indica que las personas mayores representarán el 16% de la población mundial para 2050 [1]. Las personas de la tercera edad actualmente tienden a vivir solas en viviendas independientes. Por este motivo, es necesario proporcionar sistemas de monitorización y asistencia médica a distancia. Se han desarrollado varios sistemas para este propósito utilizando técnicas de detección bien establecidas, como sensores acústicos, cámaras de video, sensores de vibración y dispositivos portables [2-5]. Sin embargo, en los últimos años ha surgido una técnica innovadora: la monitorización libre de dispositivos basada en señales de radiofrecuencia (RF). Una señal de RF muestra fluctuaciones en el receptor debido a la

absorción y los reflejos de las personas en movimiento que deambulan cerca de las antenas transmisora y receptora [6,7]. Estas fluctuaciones se pueden caracterizar para identificar actividades de la vida diaria (AVD) o para detectar eventos esporádicos importantes, como la presencia de ladrones o la ocurrencia de accidentes. Los sistemas de monitoreo de RF no son invasivos porque los usuarios no necesitan llevar un sensor. Adicionalmente, este tipo de monitorización no transgrede la privacidad del usuario dado que no se registran datos personales o imágenes.

Según la Organización Mundial de la Salud, 37,3 millones de personas mayores requieren atención médica cada año por lesiones causadas por caídas [8]. A diferencia de las AVD, como caminar, correr o subir y bajar escaleras, las caídas son eventos raros o transitorios. Esto implica que la detección de estos eventos debe abordarse desde una perspectiva diferente, buscando brindar atención médica oportuna cuando ocurre una de estas caídas.

Este trabajo presenta un análisis sistemático de los efectos de la orientación de las antenas en un sistema de detección de caídas basado en las firmas Doppler de señales WiFi. Los resultados de este trabajo están destinados a ayudar a los investigadores a determinar la mejor orientación de antena y promover el diseño de antenas multipolarizadas que mejoren las capacidades de detección del sistema sin aumentar el número de sensores (antenas) o la complejidad de los algoritmos de clasificación. Para evaluar estos efectos se presenta una plataforma experimental de detección de caídas que replica las condiciones de funcionamiento de un sistema basado en la transmisión de señales WiFi. Esta plataforma experimental nos permite calcular las firmas Doppler de la señal transmitida para que las características de las variaciones de la señal en presencia de movimientos humanos puedan identificarse y clasificarse. Se llevaron a cabo una serie de experimentos para recopilar datos empíricos sobre las firmas Doppler producidas por caídas de una escalera de tres escalones. El experimento consta de dos configuraciones de orientación de antena diferentes: horizontal a horizontal (HH) y vertical a vertical (VV). La precisión de detección obtenida para la configuración HH asciende al 92% con una tasa de falsos negativos del 8%. La configuración VV produjo una precisión del 50% y una tasa de falsos negativos del 50%. Los resultados obtenidos evidencian la importancia de considerar los efectos de la orientación de la antena para el diseño de sistemas de detección de caídas basados en WiFi.

## II. DISEÑO DEL SISTEMA

### A. Configuración del hardware

El módulo Tx de nuestra plataforma experimental comprende un generador de señales de RF conectado a una antena monopolo cuyo patrón de radiación es omnidireccional en cualquier plano perpendicular al eje del monopolo. El módulo Rx está compuesto por una antena monopolo conectada a un analizador de espectro. Ambas antenas fueron caracterizadas empíricamente para asegurar un correcto acoplamiento con el equipo de medición. Los resultados se muestran en la Tabla I. Las antenas obtuvieron los mejores parámetros a una frecuencia de 2.42 GHz utilizando un cable coaxial RG-58. Esta frecuencia de funcionamiento está dentro del rango de los sistemas WiFi comerciales (IEEE 802.11b). Nuestro módulo Tx emite un tono puro con esta frecuencia. En nuestro caso, utilizamos un generador de RF Keysight N9310A con una potencia de transmisión de 20 dBm. La señal de la sonda transmitida fue recibida por una segunda antena monopolo con las mismas características. Posteriormente, la señal fue procesada por un analizador de espectros. Nosotros usamos un analizador de espectros FieldFox N9912A. Este analizador nos permitió capturar una serie de capturas de la señal. De ese modo, fue posible registrar las firmas Doppler de la señal sonda causada por el evento de caída. La configuración utilizada para la captura se muestra en la Tabla II. Esta configuración permitió un equilibrio entre la resolución de la señal y el tiempo de barrido.

TABLA I  
PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN EN ANTENAS

| Parámetro                                | Valor       |
|------------------------------------------|-------------|
| Frecuencia                               | 2.42 GHz    |
| Pérdidas por retorno                     | 32.4 dB     |
| Impedancia                               | $50 + j0.7$ |
| Relación de onda estacionaria de voltaje | 1.042       |

TABLA II  
CONFIGURACIÓN DEL ANALIZADOR DE ESPECTROS

| Parámetro           | Valor    |
|---------------------|----------|
| Frecuencia central  | 2.42 GHz |
| Tiempo de barrido   | 271 ms   |
| Puntos de muestreo  | 1001     |
| Lapso de frecuencia | 1 kHz    |

### B. Protocolo experimental

Los datos empíricos se recopilaban para un grupo de personas que cayeron de diferentes alturas en el escenario VV y HH. Las edades de los participantes oscilaron entre los 23 y los 48 años. Además, el grupo estaba compuesto por tres hombres y tres mujeres. Todos los participantes fueron evaluados previamente para validar que se encontraban en buen estado físico. Las características físicas de cada individuo se muestran en la Tabla III. Debido a la naturaleza de la experimentación, la selección de sujetos con un rango de edad más alto podría poner en riesgo su salud.

TABLA III

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS PARTICIPANTES

| Sujeto | Años | Genero    | Altura (m) | Peso (Kg) |
|--------|------|-----------|------------|-----------|
| 1      | 23   | Femenino  | 1.61       | 60        |
| 2      | 24   | Masculino | 1.75       | 77        |
| 3      | 27   | Masculino | 1.72       | 73        |
| 4      | 38   | Femenino  | 1.55       | 58        |
| 5      | 47   | Femenino  | 1.55       | 65        |
| 6      | 48   | Masculino | 1.71       | 85        |

El protocolo de experimentación consistió en una secuencia de caídas desde una altura de 59 cm. Esta altura se determinó de acuerdo con las especificaciones del tercer escalón de una escalera. En total, los participantes realizaron una secuencia de 10 caídas para cada escenario.

El experimento comenzó con un participante colocado inmóvil en la escalera. Se configuró una señal visual y audible para notificar a los participantes el inicio y el final de la experimentación. Al comienzo de la prueba, los participantes permanecieron en un estado estático hasta que se envía una señal que indica el inicio del movimiento de caída. También se indicó a los participantes que permanecieran inmóviles una vez realizado el movimiento de caída. Las notificaciones de preparación, inicio y finalización de las pruebas fueron activadas automáticamente por el sistema para evitar la presencia de más personas cerca del escenario de prueba. Finalmente, la señal notificaba el final de la prueba a los sujetos. La información recopilada en los experimentos se utilizó en las etapas posteriores del sistema para identificar eventos de caída.

## III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos por nuestra plataforma nos permitieron evaluar el impacto de la polarización de la antena en la tasa de detección de caídas. Los resultados del procesamiento de las señales se muestran en las Figuras 1 y 2. Las dispersiones de frecuencia causadas por el movimiento humano durante las pruebas fueron notables en cada muestra de tiempo del espectrograma.

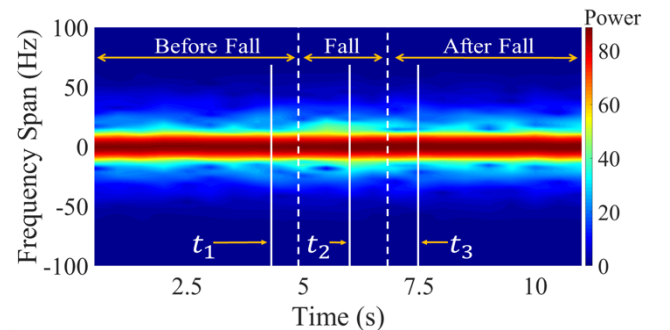


Figura 1: Firmas Doppler capturadas en los espectrogramas del caso VV.

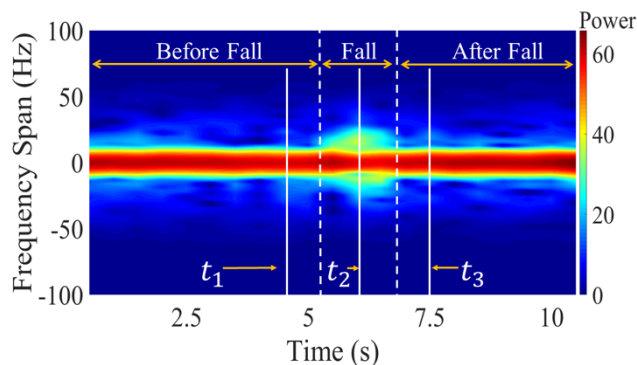


Figura 2: Firmas Doppler capturadas en los espectrogramas del caso HH.

La Figura 1 muestra los resultados obtenidos durante uno de los experimentos con la orientación VV de las antenas. El evento de caída se registró a los 6 s de la experimentación. El conjunto de datos del escenario HH se procesó siguiendo la misma metodología. Los resultados de los experimentos con esta orientación de las antenas se muestran en la Figura 2. En este caso, el evento de caída también se registró a los 6 s.

La clasificación se realizó con una máquina de soporte vectorial y los resultados se muestran en la Figura 3. Utilizando el conjunto de datos del escenario VV, se logró una precisión del 50% en la detección de caídas (Figura 3a). Por lo tanto, la tasa de falsos negativos también fue del 50%. Esto representa una alta tasa de falsas alarmas en el sistema.

Los resultados para el conjunto de datos del escenario HH se muestran en la Figura 3b. En este caso, el porcentaje de precisión aumentó. Los resultados de la evaluación mostraron una precisión del 92% en la detección de caídas. La tasa de falsos negativos se redujo al 8%. Esto indicó que las capacidades de detección del sistema se podrían incrementar analizando los efectos relacionados con la orientación de las antenas. Esto puede representar una solución a la limitación de los sistemas basados en señales RF-WiFi sin la necesidad de aumentar el número de sensores en el ambiente interior.

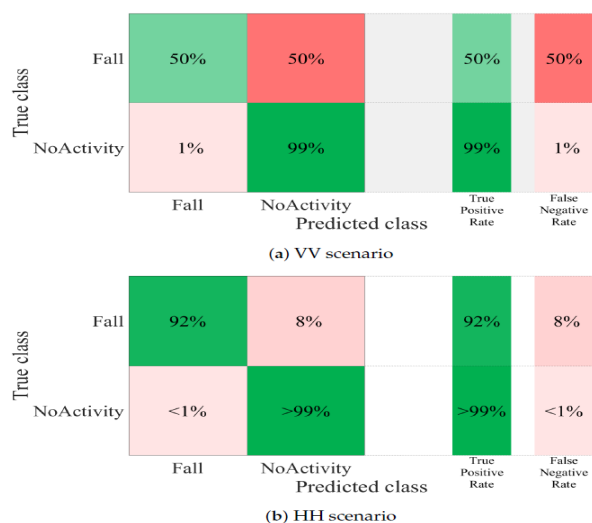


Figura 3: Matriz de confusión del algoritmo SVM.

#### IV. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio del impacto de la polarización de las antenas en la precisión de la clasificación. Para determinar este impacto, se construyó una plataforma WiFi con equipos de uso general. La plataforma utiliza señales RF-WiFi para medir las fluctuaciones provocadas por el movimiento humano sin necesidad de llevar ningún dispositivo. Se presentó el diseño y desarrollo de la plataforma, así como el protocolo de experimentación de caídas con sujetos voluntarios. A una frecuencia operativa de 2.42 GHz, registramos las firmas Doppler en una serie de espectrogramas durante las pruebas. Se propusieron dos escenarios para caracterizar los efectos causados por la orientación de la antena que impactan el desempeño de la plataforma. El escenario de la antena HH presentó fluctuaciones más prominentes durante las pruebas.

Una clasificación realizada por el algoritmo SVM demostró que cambiar la orientación de las antenas puede mejorar el rendimiento en la detección de eventos de caída. El impacto de la orientación de las antenas en el escenario HH muestra una mayor precisión sin aumentar el número de sensores. Por lo tanto, una consideración cuidadosa de la polarización de las antenas debería mejorar el diseño del sistema de detección de caídas.

#### REFERENCIAS

- [1] Nations, U. World Population Ageing 2019: Highlights; Technical Report; Department of Economic and Social Affairs, Population Division: New York, NY, USA, 2019.
- [2] Sim, J.M.; Lee, Y.; Kwon, O. Acoustic Sensor Based Recognition of Human Activity in Everyday Life for Smart Home Services. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2015, 2015, 679123.
- [3] Liu, C.; Jiang, Z.; Su, X.; Benzon, S.; Maxwell, A. Detection of human fall using floor vibration and multi-features semi-supervised SVM. *Sensors* 2019, 19, 3720.
- [4] Zhang, J.; Wu, C.; Wang, Y. Human fall detection based on body posture spatio-temporal evolution. *Sensors* 2020, 20, 946.
- [5] Hauth, J.; Jabri, S.; Kamran, F.; Feleke, E.W.; Nigusie, K.; Ojeda, L.V.; Handelzalts, S.; Nyquist, L.; Alexander, N.B.; Huan, X.; et al. Automated Loss-of-Balance Event Identification in Older Adults at Risk of Falls during Real-World Walking Using Wearable Inertial Measurement Units. *Sensors* 2021, 21, 4661.
- [6] Woyach, K.; Puccinelli, D.; Haenggi, M. Sensorless sensing in wireless networks: Implementation and measurements. In *Proceedings of the 2006 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*, Boston, MA, USA, 26 February–2 March 2006; pp. 1–8.
- [7] Lee, P.W.; Seah, W.K.; Tan, H.P.; Yao, Z. Wireless sensing without sensors—an experimental study of motion/intrusion detection using RF irregularity. *Meas. Sci. Technol.* 2010, 21, 124007.
- [8] World Health Organization. WHO Global Report on Falls Prevention in Older Age; WHO: Geneva, Switzerland, 2008.



# Sistema de clasificación y reconocimiento aéreo en tiempo real de objetos texturizados

J.M. Fortuna-Cervantes, M. Mejía-Carlos, J.S. Murguía-Ibarra, *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias-IICO, San Luis Potosí, México*

M.T. Ramírez-Torres, *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Coordinación Académica Región Altiplano Oeste, San Luis Potosí, México*

J. Martínez-Carranza, *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica, y Electrónica, Puebla, México, University of Bristol, Bristol, UK*

**Resumen**—El uso de los vehículos micro aéreos (MAV por sus siglas en inglés) o drones se ha incrementado en aplicaciones de ingeniería y civiles para explorar entornos sin información previa. En particular, dentro de la navegación autónoma, una parte fundamental es la de detectar y localizar objetivos de nuestro interés. Por esta razón, la visión por computadora se ha convertido en una herramienta de análisis esencial. En este trabajo, nos centramos en la clasificación de objetos en tareas de navegación aérea, donde interviene la textura como propiedad física del objeto. Presentamos un sistema de clasificación y reconocimiento que utiliza la transferencia de aprendizaje y características wavelet. Además, se implementa el mejor modelo dentro del entorno virtual Gazebo. Los diferentes modelos creados se entrenan con la base de datos Describable Textures Dataset (DTD), y se obtiene un rendimiento alrededor del 50% de exactitud en los tres modelos propuestos. Además, las imágenes obtenidas de el entorno virtual muestran una generalización del conocimiento para algunas clases de la base de datos DTD.

**Palabras clave**—vehículos micro aéreos, detección, sistema de clasificación, aprendizaje profundo, transferencia de aprendizaje, análisis wavelet.

## I. INTRODUCCIÓN

ESTE trabajo se ha centrado en la clasificación de la textura, particularmente en conocer la información estructural de las superficies y de los objetos [1]. Dentro del campo de desarrollo tecnológico, el análisis de texturas tiene algunas áreas de aplicación, como el diagnóstico médico asistido por computadora, reconocimiento de frutas utilizando inteligencia artificial, localización y detección en la navegación aérea con drones, por mencionar algunas. Este trabajo se ha centrado en la clasificación de la textura, particularmente en conocer la información estructural de las superficies y de los objetos [1]. Dentro del campo de desarrollo tecnológico, el análisis de texturas tiene algunas áreas de aplicación, como el diagnóstico médico asistido por computadora, reconocimiento de frutas utilizando inteligencia artificial, localización y detección en la navegación aérea con drones, por mencionar algunas.

El diseño del sistema de clasificación se desarrolla con la fusión de dos enfoques; utilizando el dominio espacial, específicamente las redes neuronales convolucionales (CNN por sus siglas en inglés) y el dominio espectral, la

transformada wavelet de Haar [2] [3] [4]. Internamente se divide en dos etapas: la primera corresponde a la extracción de características, donde nos enfocamos en utilizar una metodología llamada transferencia de aprendizaje, y la segunda a la etapa de clasificación. Con respecto a la fase de extracción de características, el tensor creado tiene un conjunto de parámetros numéricos que describen la imagen. La mayoría de estos tensores representan atributos de la imagen, como el color, la textura o la forma del objeto. Por tanto, la etapa de extracción de características es importante para el éxito general de cualquier sistema de clasificación de texturas.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera, Sección II se describe la motivación de nuestro trabajo. Sección III se introduce a la metodología y una breve descripción del proyecto. La sección IV se muestra la parte experimental. Finalmente, en la Sección V se presenta las conclusiones.

## II. MOTIVACIÓN

La motivación de nuestro proyecto se centra en el desarrollo de aplicaciones civiles y de ingeniería para explorar entornos sin información previa [5] [6] [7] [8]. En particular, dentro de la navegación autónoma, una parte fundamental es la de detectar y localizar objetivos de nuestro interés, ver figuras 1 y 2.

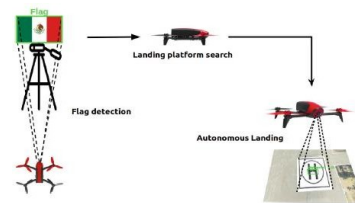


Fig. 1. Detección de objetivos para un aterrizaje autónomo [5].

También, nos enfocamos en las problemáticas que se presentan en los retos que son programados en la International Micro Air Vehicle Conference (figura 3), que este año se llevara a cabo en nuestro país [9]. Problemas que tienen que ver con la capacidad descriptiva del objeto, debido a que existen condiciones no favorables como la variación de colores, la iluminación, identidad del objeto, orientaciones, indeterminadas,



El simulador permite tener una conexión mediante el sistema operativo ROS. Por lo que el flujo de información entre los diferentes bloques del sistema es altamente confiable y su comunicación por mensajes es fluida. De manera general, el primer paso es que el modelo recibe la información a través de la cámara del dron, esta la envía mediante ROS e internamente manda el mensaje al modelo CNN. El modelo CNN, hace la inferencia o predicción del objeto texturizado, manda un ID o la etiqueta de la textura nuevamente a ROS y este a su vez la publica en un tópic. Finalmente la etiqueta la podremos visualizar dentro del plano de imagen, arriba de la región de interés, ver figura 8. En la demostración, primero activaremos la navegación del dron.

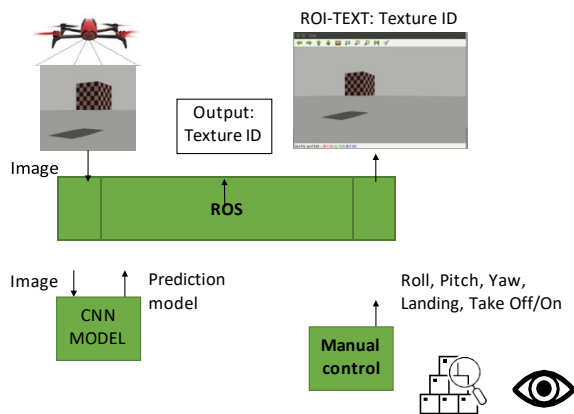


Fig. 8. Sistema de clasificación y navegación utilizando ROS-Gazebo.

Esta aún es controlada de manera manual mediante el *Keyboard* de nuestra computadora. Primero lo que necesitamos es posicionar el dron o reconocer donde se ubican los objetos texturizados. En nuestro caso hemos decidido posicionarlos en una fila para realizar algunas pruebas. De manera general, podemos ver el plano de imagen, la región de interés, la imagen que se está enviando al modelo CNN, y una terminal para visualizar el mensaje del tópic de ROS, ver figura 9. En la figura 10 se demuestra la inferencia del modelo hacia una de las 47 clases de la base de datos. En nuestro caso clasifica correctamente la textura *chequered*. El rendimiento alcanzado es bastante bueno a pesar de que solo es una primera muestra. Con respecto al tiempo de predicción relativamente es bueno, y con una latencia considerable entre la predicción y la información que envía la cámara del dron.

## V. CONCLUSIÓN

Las tareas de localización y detección de objetos utilizando información visual es un reto, en particular cuando los objetos presentan una textura repetitiva. Sin embargo, estas tareas abren la oportunidad para varias aplicaciones que utilizan vehículos micro aéreos, equipados con cámaras a bordo para la detección y reconocimiento de objetos. En este trabajo hemos adaptado el uso del análisis espectral en combinación con redes neuronales profundas. En particular, en esta propuesta, fusionamos los mapas de características espectrales (creados adicionalmente) a la predicción de la CNN. Contribuyendo en mejorar la etapa de detección y reconocimiento. Como trabajo futuro, este enfoque y el diseño del mundo virtual, permitirá



Fig. 9. Interfaz de la aplicación en el entorno virtual Gazebo. Ver en [https://youtu.be/YsvlfchC\\_Ks](https://youtu.be/YsvlfchC_Ks).

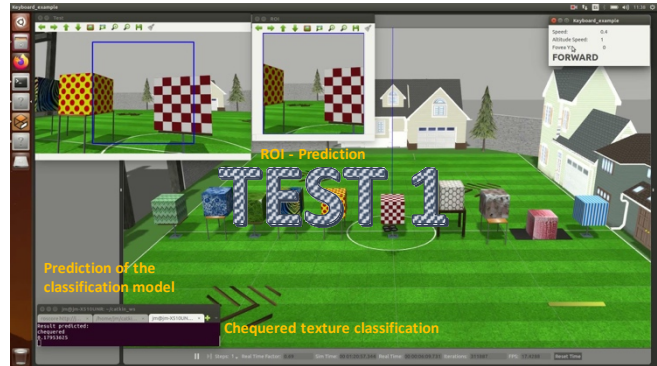


Fig. 10. Prueba 1: clasificación de la textura *chequered*.

probar otras arquitecturas, en aplicaciones de reconocimiento de patrones, tareas de clasificación y detección de objetos y así como el seguimiento de mismo.

## ACKNOWLEDGMENT

J. M. Fortuna-Cervantes es becario doctoral del CONACYT (México) en el Programa de Posgrado en “Ciencias Aplicadas” del IICO-UASLP. Los autores también quieren agradecer que este trabajo de investigación se pueda llevar a cabo a través del programa de posgrados de calidad.

## REFERENCES

- [1] N. S. Vassilieva, “Content-based image retrieval methods,” *Programming and Computer Software*, vol. 35, no. 3, pp. 158–180, 2009.
- [2] L. Yan, B. Yoshua, and H. Geoffrey, “Deep learning,” *nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.
- [3] Y. Bengio, I. Goodfellow, and A. Courville, *Deep learning*. MIT press Massachusetts, USA:, 2017, vol. 1.
- [4] S. G. Mallat, “A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, 1989.
- [5] A. A. Cabrera-Ponce and J. Martínez-Carranza, “Onboard cnn-based processing for target detection and autonomous landing for mavs,” in *Mexican Conference on Pattern Recognition*. Springer, 2020, pp. 195–208.
- [6] S. Dionisio-Ortega, L. O. Rojas-Perez, J. Martínez-Carranza, and I. Cruz-Vega, “A deep learning approach towards autonomous flight in forest environments,” in *2018 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*. IEEE, 2018, pp. 139–144.
- [7] M. López García and J. Martínez Carranza, “A first cnn-based approach towards autonomous flight for object lifting,” *Computación y Sistemas*, vol. 24, no. 3, 2020.
- [8] A. Cabrera-Ponce, L. O. Rojas-Perez, J. A. Carrasco-Ochoa, J. F. Martínez-Trinidad, and J. Martínez-Carranza, “Gate detection for micro aerial vehicles using a single shot detector,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 12, pp. 2045–2052, 2019.

- [9] (2021, nov) 12th international micro air vehicle conference and competition (imav). [Online]. Available: <https://imav2021.inaoep.mx/index.php/portal/home>
- [10] M. Cimpoi, S. Maji, I. Kokkinos, S. Mohamed, and A. Vedaldi, "Describing textures in the wild," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 3606–3613.



**J.S. Murguía-Ibarra** recibió el título de ingeniero en Electrónica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Facultad de Ciencias, S.L.P., México y el título de maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Facultad de Ingeniería, S.L.P., México, en 1999. Obtuvo el grado de doctor en Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias (IICO-UASLP), S.L.P., México, en 2003.

Actualmente es profesor investigador de tiempo completo en el Departamento de Electrónica de la Facultad de Ciencias en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Además, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores de CONACYT. Su interés en la investigación incluye procesamiento de señales y sistemas dinámicos no lineales.



**J.M. Fortuna-Cervantes** se graduó en Ingeniería Mecatrónica en el Instituto tecnológico de San Luis Potosí (ITSLP), S.L.P., México en el 2014. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias (IICO-UASLP), S.L.P., México, en 2018. Actualmente es becario doctoral en el programa de posgrados de calidad CONACYT en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, (IICO-UASLP), S.L.P., México.



**J. Martínez-Carranza** recibió el título de Ciencias de la Computación en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla, México, en 2004 y el título de maestro en Ciencias de la Computación en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), Computer Science Department. Puebla, México, en 2007. Obtuvo el grado de doctor en Ciencias de la Computación en University of Bristol. Faculty of Engineering. Bristol, UK, en 2012.

Actualmente es titular Nivel A (equivalente a Profesor Asociado) en el Departamento de Informática del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, Puebla, México. Además, es investigador Honorario Senior en el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Bristol, en el Reino Unido. Dirige el grupo de Drones Inteligentes del INAOE, trabajando en Vehículos Aéreos no Tripulados, en particular en vuelo autónomo en entornos sin GPS, para lo cual combina técnicas avanzadas de visión y robótica como visual Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM visual) en tiempo real.



**M.T. Ramírez-Torres** recibió el título de ingeniero en Mecatrónica en el Instituto tecnológico de San Luis Potosí (ITSLP), S.L.P., México en el 2009 y el título de Maestro en Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias (IICO-UASLP), S.L.P., México, en 2011. Obtuvo el grado de doctor en Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias (IICO-UASLP), S.L.P., México, en 2015.

Actualmente es profesor investigador de tiempo completo en la Coordinación Académica Región Altiplano Oeste en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Además, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores de CONACYT. Su interés en la investigación incluye procesamiento de señales y criptografía.



**M. Mejía-Carlos** recibió el título de ingeniero en Electrónica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Facultad de Ciencias, S.L.P., México, en 1992 y el título de maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), Facultad de Ingeniería, S.L.P., México, en 1997. Obtuvo el grado de doctor en Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias (IICO-UASLP), S.L.P., México, en 2001.

Actualmente es profesor investigador de tiempo completo en el Instituto en investigación en Comunicación Óptica, Facultad de Ciencias en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Además, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores de CONACYT. Su interés en la investigación incluye procesamiento de señales y comunicaciones.

# Plantillas para cosechado de energía mecánica y su conversión a energía eléctrica por medio de generadores triboeléctricos

J. R. Moreno, Facultad de Ciencias-CIACYT, [juanrobertomorenogarcia@gmail.com](mailto:juanrobertomorenogarcia@gmail.com) Gabriel González, CIACYT [gabriel.gonzales@uaslp.mx](mailto:gabriel.gonzales@uaslp.mx) y Francisco J. González, Facultad de Ciencias- CIACYT, [javier.gonzalez@uaslp.mx](mailto:javier.gonzalez@uaslp.mx)

**Resumen—** En este trabajo presentamos una plantilla triboeléctrica con membranas poliméricas compuestas con grafito y Polidimetilsiloxano (PDMS). Estas plantillas permiten la recolección de energía mecánica al caminar y su conversión a electricidad. El principio del funcionamiento de los generadores triboeléctricos, se basa en el efecto triboeléctrico y el tipo de generador más utilizado es el de contacto vertical entre dos o más materiales de distinta electronegatividad. Demostramos que el grafito combinado con PDMS es un buen candidato para generar triboelectricidad de manera efectiva a partir de la deformación mecánica del material compuesto durante las actividades de caminar y correr. El rendimiento del dispositivo se probó al caminar dando una potencia de salida de un  $15.1 \mu W$  por paso para una resistencia de  $1 M\Omega$ , que corresponde a una densidad de potencia de  $4.72 mW/m^2$ . Se tiene una base de fabricación de plantilla económica que nos permite tener un método de fabricación a gran escala de un sistema autoalimentado basado en grafito-PDMS que se puede usar en cualquier generador triboeléctrico.

## I. INTRODUCCIÓN

Los generadores triboeléctricos son capaces de producir electricidad a partir de una pequeña variación de deformación mecánica y se pueden utilizar para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo. Los generadores triboeléctricos se basan en la conjunción de triboelectricidad e inducción electrostática en la que un material se carga eléctricamente después de entrar en contacto con otro material por contacto o fricción [1]. El descubrimiento de los generadores triboeléctricos abrió un nuevo campo para que los científicos de materiales fabriquen generadores que convierten la energía mecánica a eléctrica con excelentes aplicaciones para dispositivos electrónicos portátiles, sensores y seguridad [2,3].

## II. MATERIAL Y DISEÑO DE PLANTILLAS

El generador triboeléctrico reportado, utiliza un mecanismo de separación con contacto vertical y de forma cíclica hacen contacto materiales [4] de distinta electronegatividad conocidos como metal-dieléctrico-metal. Existe una separación de 9 mm entre el metal superior y el dieléctrico. Se fabricaron membranas poliméricas, usando la técnica de mezclar PDMS con grafito en polvo, con la intención de mejorar su permitividad dieléctrica. Se elaboró una plantilla que contiene los generadores triboeléctricos mediante una técnica que se conoce como termoformado, la cual nos permite tener moldes para depositar caucho (liquido), y curar a temperatura ambiente. Para determinar las áreas donde se colocaron los generadores triboeléctricos se utilizó

una cámara térmica y un estudio de podometría para detallar las áreas de mayor presión al caminar, con la información se diseñó un molde para elaborar plantillas e incorporar generadores triboeléctricos de contacto vertical.

TABLE I  
DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES DEL GENERADOR TRIBOELÉCTRICO

| No. | Dimensiones de generador triboeléctrico |                          |                          |
|-----|-----------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|     | Nombre de componente                    | Zona 1                   | Zona 2                   |
| 1   | Superficie de los electrodos de Al      | $3.2 \times 10^{-3} m^2$ | $2.7 \times 10^{-3} m^2$ |
| 2   | Espacio entre sustrato y dieléctrico    | $9 \times 10^{-3} m$     | $9 \times 10^{-3} m$     |
| 3   | Espesor de la capa de PDMS              | $3 \times 10^{-6} m$     | $3 \times 10^{-6} m$     |
| 4   | Espesor de electrodos de Al             | $300 \times 10^{-3} m$   | $300 \times 10^{-3} m$   |

### A. Modificación físico-química de membranas poliméricas.

El presente estudio un kit de elastómero de silicona SYLGARD 182, suministrado en dos partes que consisten en la base PDMS y el componente de curado (Dimethyl, Methylhydrogen Siloxane), estos generalmente se mezclan en una relación en peso 10:1. Usamos grafito en polvo 9% en peso. La base y grafito en polvo se mezclaron durante 30 minutos con sonicador (Branson 2800), después se que se mezcló la base-grafito y el agente de curado se mezcló alrededor de 10 minutos. Depositamos el PDMS fabricado sobre sustrato de aluminio que servirá como uno de los electrodos. El curado del PDMS se realizó a temperatura ambiente durante 24 horas, para que el polímero se dispersara sobre la superficie del sustrato de aluminio, obteniendo un espesor de  $300 \mu m$ , ver Fig. 2.



Fig. 2. Procedimiento para elaborar membranas poliméricas de PDMS y grafito.

### B. Fabricación de plantilla de Caucho.

Se utilizó termografía infrarroja (IRT) para determinar la distribución de presión de la superficie plantar de los pies para personas que caminaron durante 5 minutos antes de que se realizarán las mediciones. La Figura 2 muestra la distribución de la temperatura en el pie después de caminar. De acuerdo con la distribución observada en la imagen infrarroja, se eligieron las geometrías Z1 y Z2 para las dimensiones de los electrodos para los generadores triboeléctricos de contacto vertical, para lograr una mayor área de contacto en las áreas donde se mostró mayor presión.

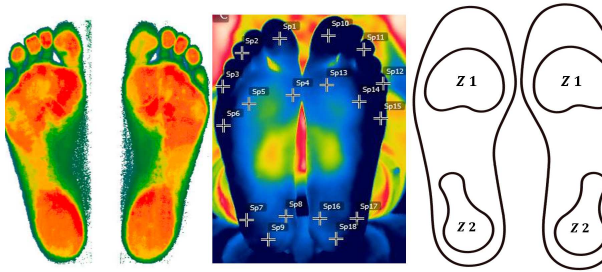


Fig. 3. Podometría y termografía plantar para determinar la presión en los pies al caminar.

Para la fabricación de las plantillas se elaboraron moldes de Etileno, basados en las regiones de interés del estudio térmico y podométrico, se modelaron en el software de diseño AutoCAD, se trazaron y cortaron piezas de MDF (Medium Density Fibreboard) para tener un molde negativo. El molde de MDF se colocó en la termoformadora Marca MATER®, proceso por el cual se calienta una lámina de etileno (60x80 cm), y por enfriamiento por ventilación se hace un semiacabado contra molde (Fig.4). Finalmente, el molde de etileno se depositó caucho sintético y se cura a temperatura ambiente durante 24 horas. En el molde de etileno se colocaron los componentes de los generadores triboeléctricos específicamente en Z1 y Z2, de tal forma que queden en contacto vertical, posterior al curado del caucho se agregan las membranas poliméricas de PDMS-Grafito (Fig. 5).

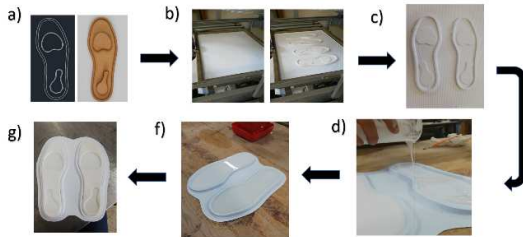


Fig. 4. Proceso de fabricación de plantilla de caucho sintético.

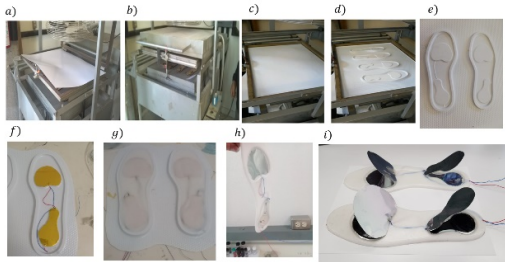


Fig. 5. Plantilla con generadores triboeléctricos.

### III. COSECHANDO ENERGÍA DEL CAMINAR HUMANO

La plantilla con generadores triboeléctricos de PDMS-grafito se integro en un zapato con diseño ergonómico. Se probó con una persona de prueba, a medida que camina o corre se aplica constantemente energía mecánica y mediante un circuito de rectificación se obtiene una salida de carga eléctrica rectificada. La plantilla con generadores triboeléctricos y los circuitos rectificadores se integraron en zapatos de calzado común. El zapato tiene una talla de 27 cm, el cual tiene una plantilla con diseño ergonómico que protege al caminante para no sentir incomodidad al caminar, además, esta protege la plantilla con los generadores triboeléctricos,

así como el circuito de rectificación se encuentra dentro de la costura.



Fig. 6. Plantilla con generador triboeléctrico y circuito de rectificación en zapato de calzado común.

Las mediciones eléctricas se realizaron con un osciloscopio Keysight Oscilloscope IniniVision DSO-X 2021A de 100 MHz, donde se midió el voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ , y su intensidad de corriente en corto circuito  $I_{sc}$  con una resistencia de  $1M\Omega$ . Se realizó la caracterización eléctrica con una persona con una masa de 75 kg y una altura de 1.78 m, mientras caminaba en una caminadora eléctrica, programada a una velocidad de 5 m/s.

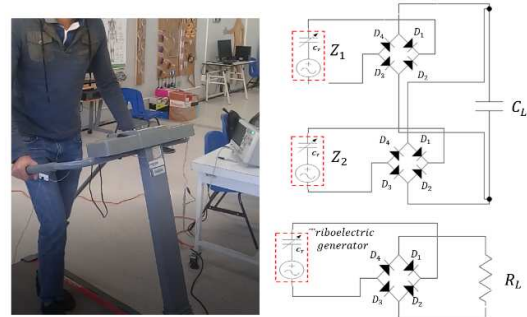


Fig. 7. Diagramas de circuito para el cálculo de la carga periódica, persona caminando a una velocidad de 15 m/s.

La plantilla con grafito-PDMS generó 6.3 V de  $V_{oc}$  y una corriente de  $3.89 \mu A$  de  $I_{sc}$  con una resistencia de  $1M\Omega$ , obteniendo una potencia de salida de  $1.3 \mu W$  en un pulso.

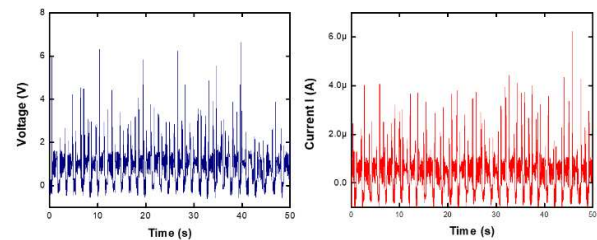


Fig. 8. Características eléctricas del generador fabricado con PDMS-grafito. a) Voltaje en circuito, b) Corriente en corto circuito.

La salida de potencia instantánea  $W=I^2R$  se calculó a partir de la intensidad de corriente con una fuerza de contacto aproximada de 695 N. El pulso instantáneo se puede calcular usando la resistencia de  $1M\Omega$ , logrando una potencia de salida de  $15.13 \mu W$  que corresponde a una densidad de potencia de  $4.72 mW/m^2$  (Fig.9).

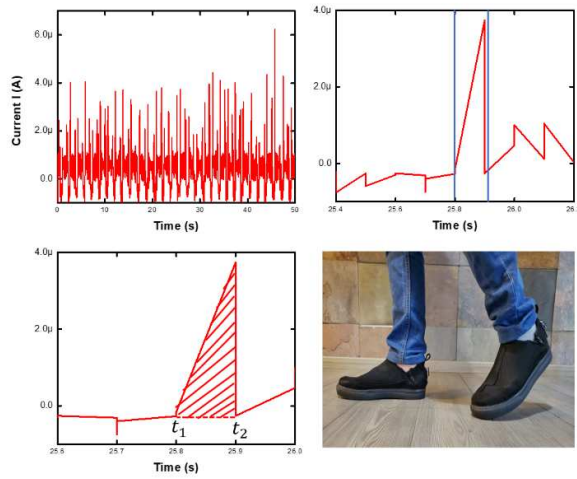


Fig. 9. Intensidad de corriente máxima de corto circuito a una fuerza de contacto vertical de 695 N, b) Vista ampliada del pulso de corriente más alta, c) Vista ampliada del pulso de corriente a una resistencia de  $1M\Omega$ . d) imagen digital del calzado común con la plantilla triboeléctrica.

$$P_{densidad} = \frac{Potencia [W]}{Area [m^2]} = \frac{15.13 \mu W}{3.2 mm^2} = 4.72 mW/m^2 \quad (1)$$

Cuantificamos la eficiencia de conversión de energía del dispositivo propuesto, la energía eléctrica generada por la plantilla y la energía mecánica de cada prueba por una persona. La energía eléctrica se calculó mediante la integral de tiempo de la energía eléctrica en pulso instantáneo con la duración de un solo pico con una resistencia de  $1M\Omega$ .

$$E_{eléctrica} = \int_{t_1}^{t_2} I^2 R dt \quad (2)$$

$$E_{eléctrica} = 1 \times 10^6 \Omega \int_{t_1}^{t_2} (3.89 \times 10^{-6} A)^2 dt = 1.513 \mu J$$

La energía mecánica aplicada al generador se puede estimar mediante la suma de la energía elástica almacenada en la esponja y la energía cinética.

$$E_{cinética} + E_{esponja} = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} kx^2 = 46.81 \mu J \quad (3)$$

Donde la masa del electrodo móvil es de  $m=14.06g$  y la velocidad del electrodo móvil cuando hace contacto con la película de PDMS-grafito es aproximadamente de  $0.03 m/s$ . La energía de potencia podemos considerar el comportamiento del electrodo superior como una masa [5], separados con una masa, separados por un resorte (esponja), considerando con una constante  $k = 9N/m$ . Por lo tanto, podemos calcular la eficiencia energética como:

$$\eta = \frac{E_{eléctrica}}{E_{mecánica}} \times 100 = \frac{1.51 \mu J}{46.81 \mu J} \times 100 = 3.22\% \quad (4)$$

La potencia de salida mejorada del generador fabricado con grafito -PDMS permite aplicaciones a gran escala. El generador permite encender hasta 72 LEDs, no hay problema en el funcionamiento de los LED y estimación del voltaje de salida del funcionamiento del LED.

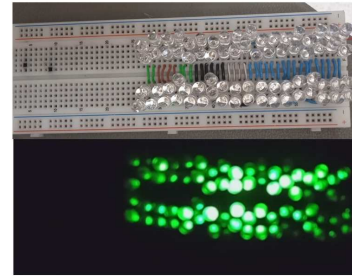


Fig. 9. Zapato incorporado a plantilla con generadores triboeléctricos encendiendo 72 LEDs verdes.

#### IV. CONCLUSIONES

Se estudio la influencia del grafito en el PDMS para aplicación de generadores triboeléctricos, hemos demostrado que es un buen candidato para generar triboelectricidad de manera efectiva a partir de la deformación mecánica del compuesto durante las actividades de caminar o correr. El rendimiento del dispositivo se probó para caminar dando una potencia de salida de  $15.1 \mu W$  por paso para una resistencia de  $1M\Omega$ , que correspondía a la densidad de potencia de  $4.72 mW/m^2$ , respectivamente. Además, hemos fabricado una plantilla económica que nos permite tener un método de fabricación a gran escala de la plantilla con generadores triboeléctricos que se pueden utilizar para cualquier combinación posible de materiales, con la intención de mejorar la eficiencia de conversión de energía mecánica a eléctrica.

#### RECONOCIMIENTOS

Agradecimiento al laboratorio de ergonomía de la Facultad del Habita de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por permitirnos el uso de la caminadora. Además, a la Diseñador Industrial Alejandra Antunez por apoyo y colaboración de los diseños. A los compañeros y catedráticos del grupo de Centro de Ciencia y Tecnología en Terahertz. Al laboratorio Nacional de Ciencia y Tecnología en Terahertz (LANCYT) y a la Coordinación y la Innovación de la ciencia y la tecnología (CIACYT).

#### REFERENCIAS

- [1] Kim; M.P., et al., Molecular structure engineering of dielectric fluorinated polymer for enhanced performances of triboelectric nanogenerators. *Nano Energy*, 2018. 53: p. 37-45.
- [2] Zhog, J., et al., Finger Typing driven triboelectric nanogeneragor and it use for instantaneously lighting up LEDs. *Nano Energ.*, 2013. 2(4): p. 491-497
- [3] Fan, F.-R., Z.-Q. Tian, and Z. Lin Wang, Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 2012. 1(2): p. 328-334.
- [4] Zhou, L, et., Triboelectric nanogenerators: Fundamental physics and potential application. *Friction*, 2020 8(3): p.481-506
- [5] Davis, B.R, D. Abbott, and J. M. Parrondo, Thermodynamic energy exchange a moving plate capacitor. *Chaos*, 2001, 11(3): p. 747-754.



# Micro-espectrómetro de reflectancia diferencial basado en un PMT de 64 canales: materiales policristalinos

L. Rodríguez Salas, Alfonso Lastras Martínez, Óscar Núñez Olvera

Instituto de Investigación y Comunicaciones Ópticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. IICO-UASLP  
San Luis Potosí, México

**Resumen—** En éste proyecto se presenta un espectrómetro de micro-reflectancia diferencial ( $\mu$ RDS) basado en un PMT de 64 canales como detector de luz, diseñado para el análisis de materiales policristalinos. El espectrómetro consta de un modulador fotoelástico que trabaja a 50 kHz para la modulación de la luz polarizada, donde los 64 elementos del detector están multiplexados a un único amplificador lock-in para integrar cada canal por separado. La resolución espacial es de aproximadamente 2,8 mm x 2,8 mm en un rango espectral de 185 nm a 650 nm. En éste caso particular, se muestran los resultados del análisis en obleas de silicio policristalino, con el objetivo de revelar las diferentes orientaciones cristalográficas presentes en el material. La  $\mu$ RDS, es una técnica que mide los espectros de RD procedentes de una zona específica de la muestra, lo que proporciona una imagen clara y precisa del mapa de distribución de tensiones dentro del material, lo cuál permite generar un mapa topográfico de la superficie. [1] [2] [3] [4]

**Palabras Clave-** Reflectancia Diferencial, PMT, Silicio policristalino, multiplexado, celdas solares.

## I. INTRODUCCION

Las sustancias cristalinas se caracterizan por una periodicidad perfecta (o casi perfecta) en su estructura atómica (el silicio entre ellas); dicha regularidad de estructura proporciona un cuadro conceptual muy simple de un cristal y facilita la tarea de comprender y calcular sus propiedades físicas. Por esta razón, los sólidos cristalinos se comprenden mejor físicamente que los sólidos y líquidos amorfos. También es necesario comprender que las muestras macroscópicas de sólidos cristalinos tales como metales, cerámicas, sales iónicas etc., no siempre se componen de un solo cristal, sino que a menudo están formados por un conjunto o conglomerado de pequeñas unidades de cristal cada una con diferentes orientaciones cristalográficas, separadas entre si por fronteras o límites de grano que se pueden considerar como regiones definidas de rupturas y dislocaciones reticulares muy grandes; dichas fronteras o límites de grano pueden influir en las propiedades físicas de las muestras cristalinas macroscópicas.[5]

La espectroscopia de reflectancia diferencial, (RDS por sus siglas en ingles) es una herramienta importante para la caracterización óptica de semiconductores cúbicos.

Entre sus aplicaciones mas importantes se encuentran, la caracterización de procesos superficiales, campos eléctricos superficiales y defectos y tensiones en el material.

Existen informes de espectrómetros basados en una cámara CCD para medir micro-espectroscopia de reflectancia diferencial, con la desventaja de que no utilizan la técnica lock-in, y en consecuencia, los espectros RD son más ruidosos que los medidos con un fotomultiplicador y las técnicas lock-in. Hu *et al* [6] describieron un espectrómetro de RD multicanal basado en un compensador giratorio como modulador polarizado y en detectores de matriz lineal CCD, con lo que se consigue una mayor resolución de los espectros. También se describe un espectrómetro RD rápido de 32 canales, [7] basado en el diseño PEM mono canal de Aspnes, [8] utilizando un detector de 32 elementos multiplexado a un único amplificador lock-in para la operación multicanal, donde el lock-in debe integrar cada canal a su vez, para su aplicación a la monitorización in situ de las primeras etapas del crecimiento epitaxial de semiconductores.

En este trabajo se reporta un espectrómetro de RD diseñado mediante el uso de un PMT de 64 canales y multiplexado a un único amplificador lock-in, sacrificando la velocidad de los espectrómetros basados en una cámara CCD, para obtener espectros de RD más limpios que permitan estudiar el comportamiento de los diferentes cristales que se pueden encontrar en los materiales policristalinos, interpretar lo que ocurre en los límites de los granos y caracterizar la homogeneidad del material, en nuestro caso particular, la muestra de estudio es una oblea comercial de silicio policristalino tipo *P*, y resistividad de menos de 0,1 ohm/cm.

## II. DESCRIPCION DEL INSTRUMENTO

El montaje experimental del sistema óptico se ilustra esquemáticamente en la figura 1. La fuente de luz proviene de una lámpara de Xenón de 75W que se enfoca con dos espejos (uno plano y el otro esférico) sobre la rejilla de entrada de un monocromador, el haz de luz que sale del monocromador, es dirigido a un prisma polarizador por medio de otros dos espejos, el haz de luz, ahora polarizado, incide sobre la muestra del material y el reflejo de luz que emite la muestra, pasa a través de un modulador fotoelástico (PEM). Cuando el PEM se enciende, la fase de la componente de polarización

perpendicular al plano de incidencia, switchea entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  a una frecuencia de 50 KHz, el PEM se opera con  $\lambda/2$  durante todo el rango de longitud de onda. Una vez que el haz de luz pasa a través del modulador fotoelástico, es dirigido a un prisma depolarizador, para posteriormente ser enfocado a la cara frontal del tubo fotomultiplicador con la ayuda de otros dos espejos, uno esférico y otro plano.

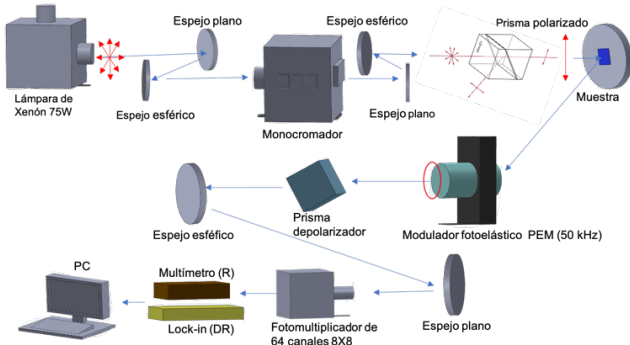


Figura 1. Esquema óptico del espectrómetro de micro-reflectancia diferencial basado en un fotomultiplicador de 64 canales, con un rango espectral de 150 nm a 650 nm y una resolución espacial de 2.8 mm x 2.8 mm.

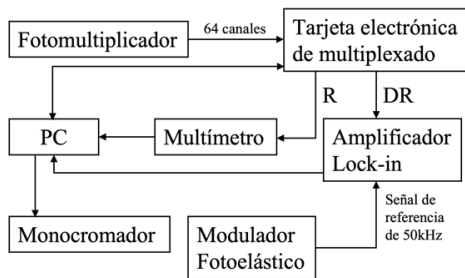


Figura 2. Diagrama eléctrico a bloques del espectrómetro de micro-reflectancia diferencial.

En la Figura 2 se muestra el diagrama eléctrico a bloques del instrumento de micro-reflectancia diferencial basado en un fotomultiplicador de 64 canales como sensor de luz.

Para el procesamiento de la señal, las 64 salidas del tubo fotomultiplicador son multiplexadas a un solo amplificador lock-in (Stanford SR-510) sintonizado a 100 kHz, que es dos veces la frecuencia del funcionamiento del modulador fotoelástico (PEM). La operación de multiplexado se realiza con 4 multiplexores analógicos de 16 canales cada uno (MAXIM MAX306CPI) operados con  $\pm 15$  V para garantizar un rápido switcheo entre canales. La alimentación de alto voltaje para la matriz fotomultiplicadora se realiza con un modulo C10940-03-R2 de hamamatsu con interfaz en LabView a través de comunicación serial RS 485. La comunicación para el switcheo de canales y para el manejo del monocromador se realiza a través de la PC (LabView) y un arduino-mega. La señal de R pasa directamente a un multímetro Fluke 520, y la señal de DR es procesada y comparada con la señal de referencia en un amplificador lock-

in. La interfaz de todo el instrumento está programada en LabView.

### III. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Para comprobar y garantizar el funcionamiento del instrumento, se realizaron pruebas a diferentes muestras, entre ellas silicio (110) y GaAs, obteniendo espectros característicos de estos materiales en cada uno de los 64 canales del fotomultiplicador. La Figura 3 muestra algunas de estas mediciones.

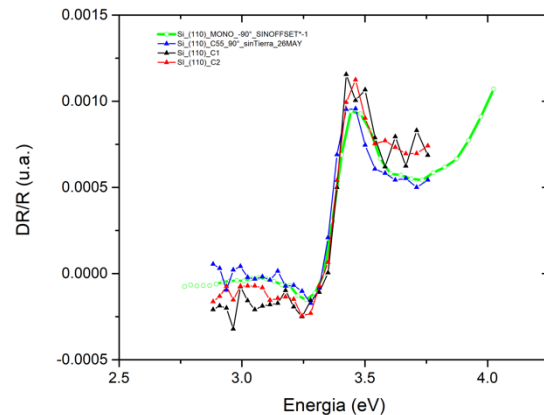


Figura 3. Gráfica representativa de los espectros que se están obteniendo con el instrumento. Las señales en azul, rojo y negro pertenecen a diferentes canales del fotomultiplicador y la señal en verde es la señal de referencia del silicio (110) medida con un fotomultiplicador de un solo canal.

En la gráfica de la Figura 4, se pueden observar los espectros pertenecientes a una muestra de silicio policristalino, aquí se puede ver hay espectros que cambian de signo y espectros que no presentan ningún tipo de señal o señal nula, lo que es un indicativo de que las mediciones que registra cada canal del fotomultiplicador provienen de diferentes regiones de la muestra, y también de cristales con diferente orientación cristalográfica o de fronteras de grano entre cristales.

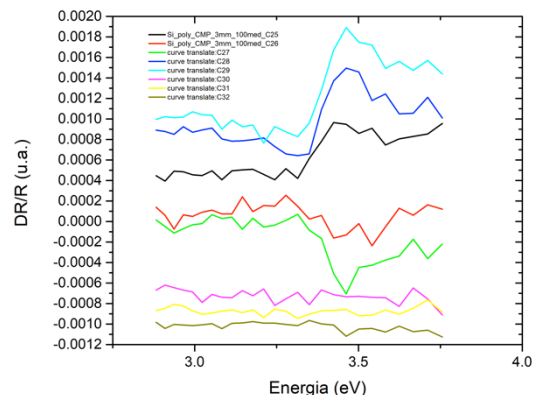


Figura 4. Espectros pertenecientes a una muestra de silicio policristalino, aquí podemos observar señales que cambian de signo y señales nulas. Estas señales provienen de diferentes zonas de la muestra y por ende pertenecen a cristales con diferente orientación cristalográfica.

La Figura 5 pertenece a los mapas de la superficie del material medido, una vez que los espectros han sido procesados matemáticamente para generar la distribución de las amplitudes de las señales obtenidas.

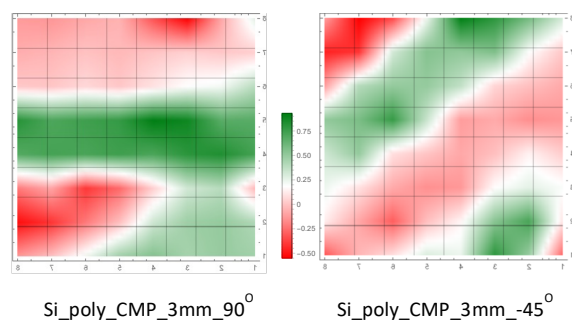


Figura 5. Mapas de la distribución espacial de la superficie de la muestra obtenidos a partir de una interpolación lineal de los espectros de RD medidos.

Se puede resumir entonces que, se ha descrito un espectrómetro de  $\mu$ RDS que utiliza un PMT de 64 canales como sensor de luz. El instrumento fue probado con muestras de Si(110) y GaAs antes de medir muestras de un material policristalino (Si). Se ha comprobado que la sensibilidad del instrumento puede detectar señales que provienen de diferentes zonas de la muestra que pertenecen a cristales con diferente orientación cristalográfica distinguiendo perfectamente cambios de signo en dichas señales o señales nulas. También se han generado mapas de la distribución espacial de la superficie de la muestra que nos dejan ver la orientación cristalográfica de los granos y las fronteras de grano.

Como trabajo en el futuro cercano, queda mejorar aún más la resolución espacial del instrumento modificando la parte óptica.

## REFERENCIAS

- [1] Acosta-Ortiz, S. E., & Lastras-Martínez, A. (1987). Measurements of above-bandgap optical anisotropies in the (0 0 1) surface of GaAs. *Solid state communications*, 64(5), 809-811.
- [2] Acosta-Ortiz, S. E., & Lastras-Martínez, A. (1989). Electro-optic effects in the optical anisotropies of (001) GaAs. *Physical Review B*, 40(2), 1426.
- [3] Lastras-Martínez, L. F., Castro-García, R., Balderas-Navarro, R. E., & Lastras-Martínez, A. (2009). Microreflectance difference spectrometer based on a charge coupled device camera: surface distribution of polishing-related linear defect density in GaAs (001). *Applied optics*, 48(30), 5713-5717.
- [4] Lastras-Martínez, L. F., del Pozo-Zamudio, O., Herrera-Jasso, R., Ulloa-Castillo, N. A., Balderas-Navarro, R. E., Ortega-Gallegos, J., & Lastras-Martínez, A. (2012). Micro reflectance difference techniques: Optical probes for surface exploration. *physica status solidi (b)*, 249(6), 1119-1123.
- [5] J. Mckelvey, Editorial Limusa, SA de CV México, DF.
- [6] Hu, C. G., Sun, L. D., Flores-Camacho, J. M., Hohage, M., Liu, C. Y., Hu, X. T., & Zeppenfeld, P. (2010). A rotating-compensator based reflectance

difference spectrometer for fast spectroscopic measurements. *Review of Scientific Instruments*, 81(4), 043108.

[7] Núñez-Olvera, O., Balderas-Navarro, R. E., Ortega-Gallegos, J., Guevara-Macías, L. E., Armenta-Franco, A., Lastras-Montañón, M. A., & Lastras-Martínez, A. (2012). A rapid reflectance-difference spectrometer for real-time semiconductor growth monitoring with sub-second time resolution. *Review of Scientific Instruments*, 83(10), 103109.

[8] Aspnes, D. E., & Studna, A. A. (1985). Anisotropies in the above—band-gap optical spectra of cubic semiconductors. *Physical review letters*, 54(17), 1956.



# Visualización de interferencia en ritmos y frecuencias audibles. Aproximación desde el arte

Iván Manuel Beltrán Loredo. *Facultad de Artes. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos. ivanbeltranloredo@gmail.com*

**Resumen**—El proyecto aborda el desarrollo de un gráfico digital para visualizar en tiempo real los procesos de interferencia entre frecuencias sonoras mediante el uso del efecto Muaré en un arreglo polar.

Se realizaron diversos dispositivos tangibles y virtuales para poder experimentar distintas alternativas de interacción. Uno de los principales atributos del gráfico es la posibilidad de representar batimientos acústicos en una imagen en donde se observa el patrón de interferencia a la vez que es visible cada ciclo de las frecuencias analizadas.

## I. INTRODUCCIÓN

El gráfico descrito en este documento se desprende de mi proyecto de maestría, el cual consiste en la generación de complejidades sonoras rítmicas, o polirritmias, mediante la distribución de una serie de goteos cayendo sobre membranas percutivas, a ritmos constantes y desfases entre sí.

Para poder comprender y representar mejor los patrones que se estaban formando, recurrí al uso de gráficas para superponer las secuencias de eventos sonoros periódicos, mediante el uso de líneas rectas. (Fig. 1).

## II. APLICACIÓN DEL EFECTO MUARÉ

A partir de la elaboración de este gráfico (Fig. 1), en el que se plasma la superposición de ocho secuencias de goteo, nació mi interés por explorar las posibilidades visuales de este tipo de representaciones de interferencia, lo que me llevó a comenzar diversos procesos de experimentación con medios digitales, entre los cuales el acierto más significativo fue disponer las “frecuencias” o secuencias de líneas equidistantes en un arreglo circular. (Fig. 2).

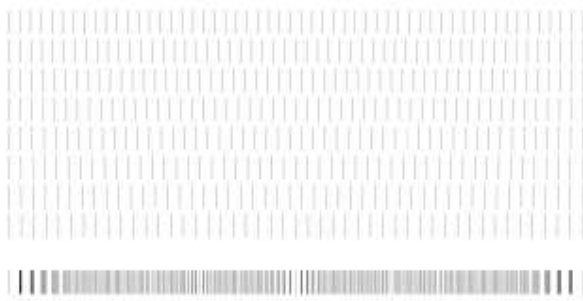


Fig. 1. Representación de goteos constantes a velocidades ligeramente distintas. El renglón inferior es la superposición de los otros ocho.



Fig. 2. Representación de superposición de secuencias en arreglo polar.

Al colocarlas de este modo, pude observar que los patrones formados por los desfases entre secuencias tenían mucha más pregnancia que los obtenidos con la disposición en línea recta, sobre todo al aumentar el número de líneas de cada secuencia.

Lo anterior ocurre debido a que en la disposición circular los espacios entre líneas no son constantes. Éstos van decreciendo a medida que se acercan al centro, mientras que el grosor de las líneas sí es constante, lo que ocasiona que a partir de determinado punto las líneas comiencen a superponerse produciendo el efecto Muaré, lo que a su vez provoca que dejemos de ver únicamente líneas y comencemos a percibir formas.

El siguiente paso lógico fue extender las líneas hasta llegar al centro, lo que termina de darle unidad a los patrones formados por las polirritmias al conformar una mancha que sintetiza los efectos de la interacción perceptual de sonidos.

Si observamos la representación visual de ocho secuencias concéntricas variando el número de líneas o “frecuencia” en aumentos de 1, la diferencia entre las secuencias es prácticamente imperceptible cuando se disponen individualmente (Fig.3). Sin embargo, en el gráfico de la Fig.4, se encuentran las mismas ocho secuencias, pero esta vez superpuestas, lo que posibilita percibir las pequeñas diferencias entre frecuencias mediante la mancha resultante de la interferencia visual.

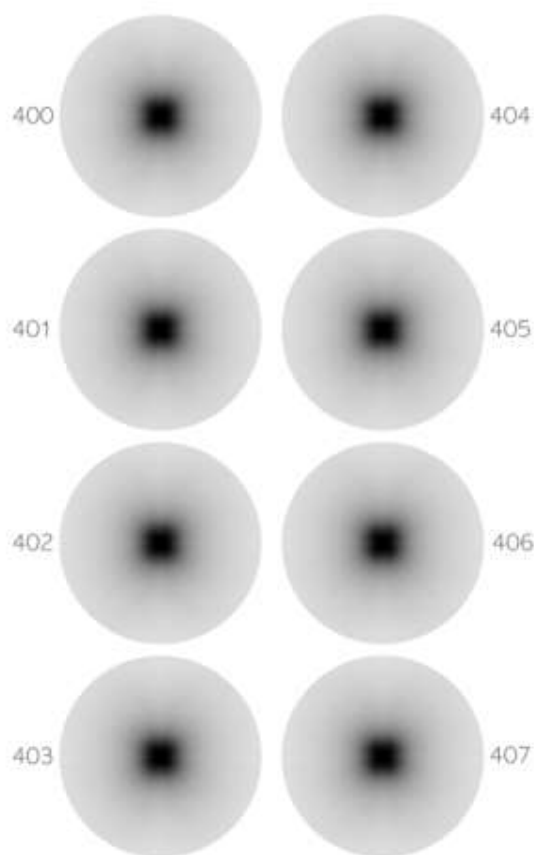


Fig. 3. Secuencias de líneas concéntricas en incrementos de 1.

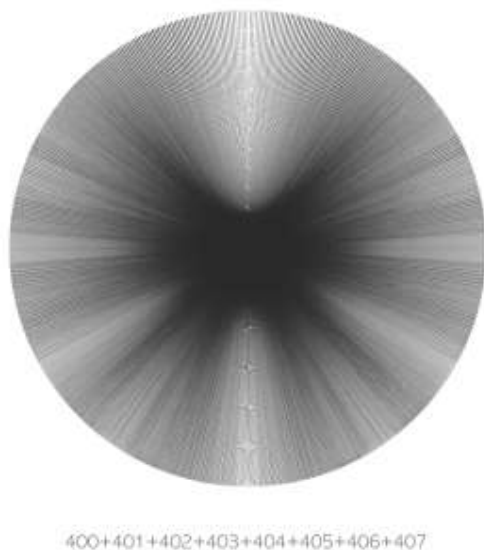


Fig. 4. Superposición de las 8 secuencias mostradas en Fig. 3. Podemos observar cómo los espacios que conforman la figura responden a las relaciones que guardan las secuencias, siendo la más visible la que está a la mitad ( $1/2$ ) seguida de los tercios, luego los cuartos, etc.

### III. VISUALIZACIÓN DE BATIMIENTO ACÚSTICO.

Una cualidad interesante de esta visualización es que si consideramos que una rotación en el sentido de las manecillas del reloj (de 12 a 12) equivale a un segundo, se pueden representar superposiciones de frecuencias audibles y hacer visible el resultado del fenómeno de batimiento acústico. Por ejemplo, si escuchamos al mismo tiempo un tono puro (sin armónicos) de frecuencia 440 Hz y otro tono puro de frecuencia 445 Hz, el resultado sería que interferirían entre ellas dada su proximidad. Esta interferencia (también denominada pulsación o batido) tendría una frecuencia de 5 Hz, es decir, en un segundo sucederían 5 momentos de reducción de amplitud, ya que la frecuencia del batimiento es igual a la diferencia entre las dos frecuencias que están interfiriendo.

Si realizamos un nuevo gráfico y colocamos dos secuencias de líneas dispuestas circularmente, una de 440 y otra de 445, podemos observar que se forman 5 áreas más sombreadas, que corresponderían a la frecuencia de decrementos de amplitud del batimiento, mientras que las áreas más iluminadas corresponderían a los momentos con mayor amplitud o volumen (Fig. 5).

Esto resulta interesante desde un punto de vista analítico, ya que los gráficos que se utilizan para representar el batimiento acústico generalmente plasman solo una sección de las ondas para poder explicar el fenómeno, pero en este caso es posible visualizar en una sola imagen cada ciclo individual (representado con una línea), así como los resultados de la interferencia del conjunto.

Aunque la forma de la mancha pueda resultar complicada (como en el ejemplo de la Fig. 4.), los patrones de la forma resultante siempre responden a la relación que guardan las secuencias de líneas (o frecuencias de eventos) entre sí.

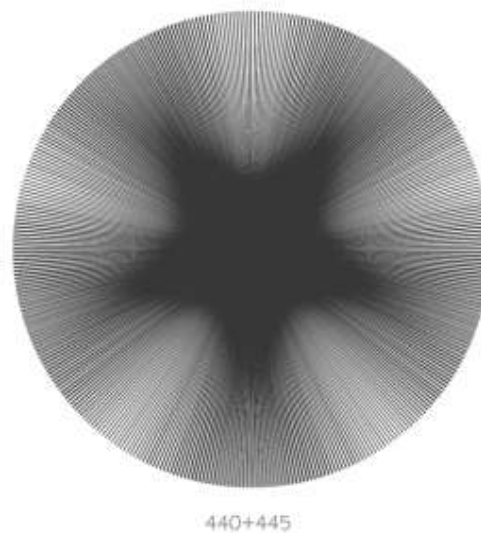


Fig. 5. Representación de batimiento acústico entre una frecuencia de 400Hz y una de 405Hz.

#### IV. DISPOSITIVOS

Para continuar con la etapa de experimentación desarrollé algunos prototipos físicos y virtuales para poder controlar diversos parámetros y visualizar los resultados en tiempo real. Entre estos parámetros variables establecí el número de secuencias, el número de líneas por secuencia (frecuencia), el grosor de las líneas y el giro o desfase entre secuencias.

El primer dispositivo que construí para interactuar de manera táctil y en tiempo real con las interferencias visuales de los diagramas consistió en la impresión de cuatro secuencias de líneas en hojas de acetato con “frecuencia” similar, pero cada capa con un incremento de una línea. Corté los patrones circulares de acetato y los uní por el centro con un alfiler, permitiendo el movimiento rotatorio de cada capa individual con la ayuda de una pequeña pestaña que contiene el número de líneas total de cada hoja para poder identificarlas (Fig. 6).

El dispositivo me permitió generar una especie de dibujo interactivo, donde la mancha central se transforma de manera fluida al momento de rotar cada una de las pestañas de las capas de acetato. Sin embargo, las hojas de acetato no son totalmente planas y presentan cierto grado de ondulación, lo que provoca que se distorsione la rectitud de las líneas y como consecuencia la mancha resulta más caótica que las creadas con anterioridad con el uso de ordenador.

Si bien esta distorsión se puede aprovechar como un recurso gráfico, entraba en conflicto con la premisa de mi proyecto de generación de complejidad únicamente con la superposición de elementos simples, en este caso las líneas, por lo que opté por desarrollar una versión digital del dispositivo, buscando la precisión de los primeros gráficos que desarrollé, pero conservando también la posibilidad de interacción física en tiempo real (Fig. 7).



Fig. 6. Dispositivo manual para visualización de interferencia entre secuencias de líneas.

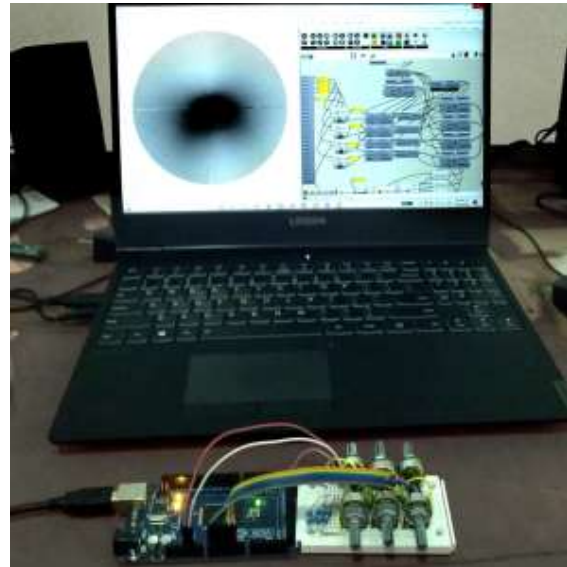


Fig. 7. Dispositivo electrónico para visualización de interferencia entre secuencias de líneas.

Una vez que estuve utilizando la interfaz electrónica para controlar la imagen digital, me surgió el interés por encontrar un modo de articular el gráfico con el sonido real de gotas cayendo que constituyen el tema central de mi proyecto de maestría, recordando que los diagramas eran inicialmente una representación de estas. Decidí entonces vincularlos mediante el uso de sensores de sonido, de modo que el impacto percetivo producido por cada gota cayendo añadiera una línea a las secuencias de líneas superpuestas, configurando así una gráfica en tiempo real de los eventos sonoros acontecidos. Esta idea es la que desarrollé como pieza final para culminar el proceso de experimentación (Fig. 8).



Fig. 8. Instalación sonora final. El sonido de cada gota cayendo añade una línea a la secuencia respectiva de la composición central. La imagen proyectada hacia el suelo es una gráfica en tiempo real de la polirritmia sonora.

#### RECONOCIMIENTOS

Este proyecto fue patrocinado por CONACYT a través de la Maestría en Producción Artística como parte del Programa Nacional de Posgrados de Calidad.

